

**TRABAJO DE GRADO PARA APLICAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
DISEÑO DE UN MANUAL ACADÉMICO PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE
ARIETE UTILIZANDO EL SOFTWARE ALLIEVI MEDIANTE CASOS SIMULADOS
Y BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN.**

FABIÁN ANDRÉS RODRÍGUEZ MORA

CÓDIGO: 1611017

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA

2026-I

**TRABAJO DE GRADO PARA APLICAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
DISEÑO DE UN MANUAL ACADÉMICO PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE
ARIETE UTILIZANDO EL SOFTWARE ALLIEVI MEDIANTE CASOS SIMULADOS
Y BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN.**

PRESENTADO POR:

FABIÁN ANDRÉS RODRÍGUEZ MORA

CÓDIGO: 1611017

ESTUDIANTE

DIRECTOR

ING. FELIPE SANTAMARIA ÁLZATE

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2026-I

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, damos constancia de que la estudiante abajo firmante ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple en su totalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Civil y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra preparada para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto de Colombia.



ING. FELIPE SANTAMARIA ALZATE

Director del Proyecto

INTEGRANTE



FABIAN ANDRES RODRIGUEZ MORA
Estudiante de Ingeniería Civil

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	9
2. ABSTRACT	11
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
4. INTRODUCCION	15
5. OBJETIVO GENERAL	17
6. OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
7. JUSTIFICACIÓN	19
8. MARCO TEORICO	20
8.1 ORIGEN DEL GOLPE DE ARIETE	22
8.2 VÁLVULAS EN SISTEMAS HIDRÁULICOS PRESURIZADOS.....	30
8.2.1 TIPOS DE VÁLVULAS Y SU FUNCION	31
8.2.1.1 Válvulas de compuerta.....	32
8.2.1.2 Válvulas de mariposa.....	33
8.2.1.3 Válvulas de globo.....	34
8.2.1.4 Válvulas de check o de retención	35
8.2.1.5 Válvulas de alivio y protección	36
8.3 ENVOLVENTE DE PRESIONES EN EL ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE	41
8.3.1 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA	42
8.3.2 IMPORTANCIA EN EL DISEÑO HIDRAULICO.....	43
8.3.1 ENVOLVENTE MAXIMA Y MINIMA	47
9. METODOLOGÍA.....	48
9.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
10. GENERALIDADES DEL SOFTWARE ALLIEVI	51
10.1 REQUISITOS TÉCNICOS Y CONFIGURACIÓN INICIAL.....	52
10.2 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA	53
11. RESULTADOS	62
11.1 Caso 1: Sistema por gravedad.....	62

11.2	Caso 2: Sistema por bombeo.....	65
11.3	Cierre rápido vs cierre lento.....	68
12.	CONCLUSIONES.....	72
13.	RECOMENDACIONES.....	74
14.	BIBLIOGRAFIA.....	76

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1.	Idealización del golpe de ariete.....	23
Imagen 2.	Diagrama de sobrepresión y depresión, para casos teóricos y reales.....	24
Imagen 3.	Representación del golpe de ariete.....	25
Imagen 4.	Propagación de onda.....	27
Imagen 5.	Válvula de compuerta.	32
Imagen 6.	Válvula de mariposa.	33
Imagen 7.	Válvula de globo.....	34
Imagen 8.	Válvula de check.	35
Imagen 9.	Válvula de alivio.....	36
Imagen 10.	Interfaz del software Allievi. Captura de pantalla tomada de Allievi (versión académica).....	55

LISTA DE GRAFICOS

Gráfica 1.	Representación de la envolvente máxima y mínima de presiones generadas durante un evento transitorio	45
Gráfica 2.	Comparación de envolventes de presión para diferentes tiempos de cierre de válvula.	46
Gráfica 3.	Verificación de la envolvente de presión respecto a la presión nominal de la tubería.....	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de válvulas en sistemas hidráulicos presurizados y su impacto en el golpe de ariete.....	38
Tabla 2. Riesgos asociados al golpe de ariete por área de aplicación en ingeniería civil.....	39
Tabla 3. Relevancia del análisis transitorio en la ingeniería civil.	40
Tabla 4. Envolvente Máxima y Mínima.	47
Tabla 5. Metodología de Investigación.	49
Tabla 6. Capacidades y enfoque del software Allievi.	56
Tabla 7. Buenas prácticas recomendadas en la modelación de transitorios hidráulicos con Allievi.	61
Tabla 8. Escenarios de cierre de válvula.....	69
Tabla 9. Comparación de resultados.	71

1. RESUMEN

El golpe de ariete representa uno de los desafíos más significativos cuando se diseñan y operan sistemas de conducción de agua a presión. Este fenómeno genera fluctuaciones bruscas de presión —tanto incrementos como caídas repentinas— que pueden comprometer seriamente la integridad de tuberías, accesorios y equipos hidráulicos si no se gestionan adecuadamente. Para analizar este comportamiento, el software Allievi se ha posicionado como una herramienta especializada de gran aceptación en el ámbito profesional. No obstante, la documentación disponible en español resulta escasa, y son pocas las referencias que facilitan un aprendizaje práctico y accesible para quienes se están formando en ingeniería.

El presente trabajo busca desarrollar un manual educativo en español que facilite tanto la comprensión teórica como el manejo práctico del software Allievi. El documento integra fundamentos conceptuales, instrucciones claras de operación, criterios para una modelación adecuada y casos de simulación basados en situaciones reales. A través de este material, se pretende fortalecer las capacidades de los estudiantes de ingeniería civil en el análisis de transitorios hidráulicos, promoviendo al mismo tiempo un uso criterioso de las herramientas tecnológicas disponibles para el diseño y evaluación de sistemas hidráulicos presurizados.

La metodología seguida contempla una revisión bibliográfica exhaustiva, el estudio detallado de las funcionalidades del software, el planteamiento de escenarios de simulación, la ejecución e interpretación de los modelos resultantes, y finalmente la estructuración del manual. El producto final se presenta en formato digital, concebido como material de apoyo para asignaturas de hidráulica e hidrosistemas en el contexto universitario.

Palabras clave: golpe de ariete, hidráulica, Allievi, simulación hidráulica, manual educativo.

2. ABSTRACT

Water hammer represents one of the most significant challenges when designing and operating pressurized water conveyance systems. This phenomenon generates abrupt pressure fluctuations—both sudden increases and drops—that can seriously compromise the integrity of pipes, fittings, and hydraulic equipment if not properly managed. To analyze this behavior, Allievi software has positioned itself as a specialized tool with wide acceptance in the professional field. However, available documentation in Spanish remains scarce, and there are few references that facilitate practical and accessible learning for engineering students.

The present work seeks to develop an educational manual in Spanish that facilitates both the theoretical understanding and practical use of Allievi software. The document integrates conceptual foundations, clear operating instructions, criteria for adequate modeling, and simulation cases based on real situations. Through this material, the aim is to strengthen the capabilities of civil engineering students in the analysis of hydraulic transients, while promoting judicious use of available technological tools for the design and evaluation of pressurized hydraulic systems.

The methodology followed includes a comprehensive literature review, detailed study of the software's functionalities, development of simulation scenarios, execution and interpretation of resulting models, and finally the structuring of the manual. The final product is presented in digital format, conceived as supporting material for hydraulics and hydrosystems courses in the university context.

Keywords: water hammer, hydraulics, Allievi, hydraulic simulation, educational manual.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando la velocidad del flujo cambia de manera abrupta en un sistema de transporte de agua a presión —por ejemplo, al cerrar rápidamente una válvula— se desencadenan lo que conocemos como transitorios hidráulicos o golpe de ariete. Las consecuencias pueden ser graves: picos extremos de presión, aparición de cavitación y deterioro de tuberías, válvulas o equipos de bombeo. De ahí que comprender este fenómeno y saber modelarlo adecuadamente sea fundamental para garantizar que los sistemas hidráulicos operen de forma segura y eficiente en el campo de la ingeniería civil.

A pesar de su importancia, muchos estudiantes y profesionales enfrentan barreras al momento de trasladar la teoría del golpe de ariete hacia aplicaciones prácticas mediante herramientas de simulación. El software Allievi es, sin duda, uno de los programas más reconocidos para este tipo de análisis. Sin embargo, nos encontramos con un problema: el material disponible en español es limitado, y son pocas las guías didácticas que expliquen paso a paso cómo utilizar el programa, cómo interpretar lo que arroja y qué criterios seguir para hacer una buena modelación.

Esta carencia de recursos accesibles no solo dificulta el aprendizaje autónomo, sino que también obstaculiza la correcta aplicación del software en el ámbito universitario. Como resultado, se generan vacíos importantes en la formación de futuros ingenieros civiles, especialmente en el área de hidráulica transitoria. Frente a esta situación, resulta necesario desarrollar un manual educativo en español que facilite el aprendizaje de Allievi a través de explicaciones claras, recomendaciones técnicas sólidas y ejemplos de simulación que reflejen casos prácticos reales.

4. INTRODUCCION

Los sistemas hidráulicos presurizados están expuestos a cambios repentinos en la velocidad del flujo, ya sea por el cierre de una válvula, variaciones en las condiciones de bombeo o incluso cortes inesperados del suministro eléctrico. Estas situaciones desencadenan fenómenos transitorios dentro de las tuberías que se manifiestan como fluctuaciones bruscas de presión, lo que comúnmente llamamos golpe de ariete. Este fenómeno no es un tema menor: plantea desafíos serios para el diseño, la operación y el mantenimiento de los sistemas de conducción, pudiendo ocasionar daños importantes en tuberías, accesorios y estaciones de bombeo, lo cual compromete tanto la continuidad como la eficiencia del servicio.

Para cualquier ingeniero civil que trabaje en hidráulica o transporte de fluidos, entender y saber analizar el golpe de ariete resulta indispensable. Aquí es donde las herramientas de simulación juegan un papel crucial, ya que nos permiten reproducir condiciones reales y observar cómo responde un sistema cuando enfrenta eventos transitorios. Entre estas herramientas, el software Allievi sobresale por su especialización en el estudio de este tipo de fenómenos en conducciones presurizadas. Sin embargo, hay un problema: la documentación y los materiales educativos en español son escasos, lo que dificulta su incorporación efectiva en el entorno universitario.

Frente a esta carencia, surge la necesidad de contar con un recurso educativo que brinde a los estudiantes de ingeniería civil una guía clara, bien estructurada y fácil de seguir para aprender a manejar Allievi. Este trabajo se propone desarrollar precisamente eso: un manual didáctico que integre los fundamentos teóricos esenciales, instrucciones detalladas paso a paso, recomendaciones prácticas y ejemplos de simulación basados en casos reales. La idea es fortalecer la formación estudiantil y facilitar una comprensión más profunda de los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos.

Al integrar teoría y práctica, este proyecto busca contribuir al desarrollo de competencias en modelación hidráulica y promover el uso adecuado de herramientas tecnológicas para el análisis de transitorios. El producto final incluye tanto un documento académico como un manual práctico que podrán utilizarse como material de apoyo en cursos universitarios o como recurso de autoestudio, impulsando una formación sólida, aplicada y acorde con las demandas actuales de la ingeniería civil.

5. OBJETIVO GENERAL

Elaborar un manual educativo en español sobre el software Allievi que integre los fundamentos teóricos del análisis de transitorios hidráulicos con una guía práctica de su funcionamiento, incorporando criterios de buenas prácticas en la modelación y casos de simulación aplicados a situaciones reales para fortalecer el aprendizaje y las capacidades técnicas de los estudiantes de ingeniería civil.

6. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Compilar los fundamentos teóricos del golpe de ariete y del análisis de transitorios hidráulicos como base conceptual para el uso del software Allievi.
- Describir la interfaz, las herramientas y las funciones principales del software Allievi, integrando buenas prácticas de modelación y criterios para interpretar adecuadamente los resultados.
- Desarrollar casos de simulación representativos de sistemas hidráulicos presurizados y documentar paso a paso su ejecución y análisis dentro del software.

7. JUSTIFICACIÓN

La hidráulica transitoria es un componente esencial en el diseño y operación de sistemas de acueducto, riego y bombeo dentro de la ingeniería civil. Sin embargo, su enseñanza tiende a concentrarse casi exclusivamente en los aspectos teóricos, lo que termina creando una distancia considerable entre lo que se aprende en el aula y lo que realmente se necesita hacer con herramientas especializadas en la práctica profesional.

Aquí es donde el software Allievi cobra relevancia, ya que se ha consolidado como una herramienta de referencia para el análisis del golpe de ariete. A pesar de esto, la escasez de manuales didácticos en español representa un obstáculo real para estudiantes y profesionales en formación que buscan dominarlo.

Desarrollar un manual educativo no solo busca cerrar esa brecha, sino también fortalecer las competencias técnicas de quienes están formándose como ingenieros civiles. La idea es que puedan entender mejor los fenómenos transitorios y, al mismo tiempo, aprender a utilizar el software de manera adecuada y eficiente dentro del contexto académico.

Más allá de eso, este manual tiene el potencial de convertirse en un recurso valioso para cursos universitarios de hidráulica y transporte de fluidos, contribuyendo así a una formación más integral, práctica y alineada con lo que realmente demanda el ejercicio profesional.

8. MARCO TEORICO

El golpe de ariete es el transitorio hidráulico más conocido y estudiado. Se produce cuando una masa de agua en movimiento se ve obligada a detenerse o acelerarse de manera súbita, generando una onda de presión que se propaga a lo largo de la tubería a una velocidad cercana a la del sonido en el fluido. Este fenómeno constituye uno de los principales riesgos en el diseño y operación de sistemas de conducción a presión, dado que las fluctuaciones de presión resultantes pueden comprometer seriamente la integridad de la infraestructura hidráulica (Chaudhry, 2014).

Lo que sucede es relativamente intuitivo: cuando el fluido en movimiento se frena, las masas de líquido que todavía avanzan impactan contra las partículas que ya se han detenido. Esta colisión, provocada por la inercia del fluido, desencadena un incremento repentino de presión —lo que llamamos sobrepresión— que viaja a través del sistema en forma de onda. La velocidad de propagación de esta onda puede incluso alcanzar valores del orden de 1000 m/s en sistemas típicos de conducción de agua, lo cual da una idea de la magnitud del fenómeno.

A diferencia del flujo estacionario, donde las variables permanecen constantes en el tiempo, los transitorios se caracterizan por su naturaleza dinámica, no lineal y altamente dependiente de las propiedades del sistema. Su análisis es fundamental para garantizar la integridad estructural de las tuberías, accesorios y equipos hidráulicos, ya que las sobrepresiones generadas pueden superar ampliamente los límites de diseño (Wylie & Streeter, 1993).

En términos prácticos, el golpe de ariete aparece cada vez que hay cambios bruscos en el régimen de flujo dentro de una tubería presurizada: un cierre repentino de válvula, la parada de una bomba, entre otros. Estos eventos generan ondas de presión que se desplazan por toda la red, pudiendo ocasionar tanto sobrepresiones como depresiones. Si no se prevén o controlan adecuadamente, estas fluctuaciones tienen el potencial de causar daños significativos en tuberías, accesorios, bombas y válvulas.

El fenómeno del golpe de ariete no es un descubrimiento reciente. Su estudio surge a partir de problemas prácticos observados en los primeros sistemas de conducción de agua a presión durante el siglo XIX, cuando el desarrollo de redes urbanas y sistemas industriales comenzó a evidenciar fallas inesperadas en tuberías y válvulas tras maniobras rápidas de cierre.

Antes de su formalización matemática, los ingenieros ya habían identificado que el cierre brusco de válvulas generaba ruidos violentos y vibraciones en las conducciones. Estos efectos eran interpretados inicialmente como simples choques mecánicos internos, sin una comprensión clara del comportamiento dinámico del fluido.

Con el crecimiento de los sistemas de abastecimiento en ciudades europeas durante la Revolución Industrial, el fenómeno comenzó a estudiarse de manera más rigurosa, debido a los frecuentes daños estructurales que ocasionaba.

8.1 ORIGEN DEL GOLPE DE ARIETE

El fenómeno del golpe de ariete fue estudiado y formalizado a finales del siglo XIX por el ingeniero ruso Nikolay Zhukovsky (también citado como Joukowsky). Sus investigaciones en dinámica de fluidos permitieron establecer la relación directa entre la variación brusca de la velocidad del flujo en una conducción y el incremento instantáneo de presión que se genera como consecuencia de dicha perturbación.

Joukowsky demostró que cuando un flujo en régimen permanente es detenido de manera súbita —por ejemplo, debido al cierre rápido de una válvula— la energía cinética del fluido se transforma en energía de presión, originando una onda de sobrepresión que se propaga a lo largo de la tubería a una velocidad determinada por las propiedades del fluido y la elasticidad del material de la conducción. Este comportamiento dinámico marcó el inicio del análisis moderno de los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos.

El resultado más relevante de sus estudios es la conocida **ecuación de Joukowsky**, que expresa la variación de presión como:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

ΔP = incremento de presión (Pa)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

c = velocidad de propagación de la onda (m/s)

ΔV = variación de la velocidad del flujo (m/s)

Esta ecuación constituye la base teórica para estimar la magnitud del golpe de ariete en sistemas simples, especialmente en análisis preliminares y diseños conceptuales. Sin embargo, su formulación parte de ciertas hipótesis idealizadas, como el cierre instantáneo de la válvula, flujo unidimensional y comportamiento elástico lineal del sistema fluido–tubería. En sistemas reales, factores como la fricción, la presencia de aire disuelto, la rugosidad interna y la interacción estructura–fluido pueden modificar significativamente la respuesta transitoria.

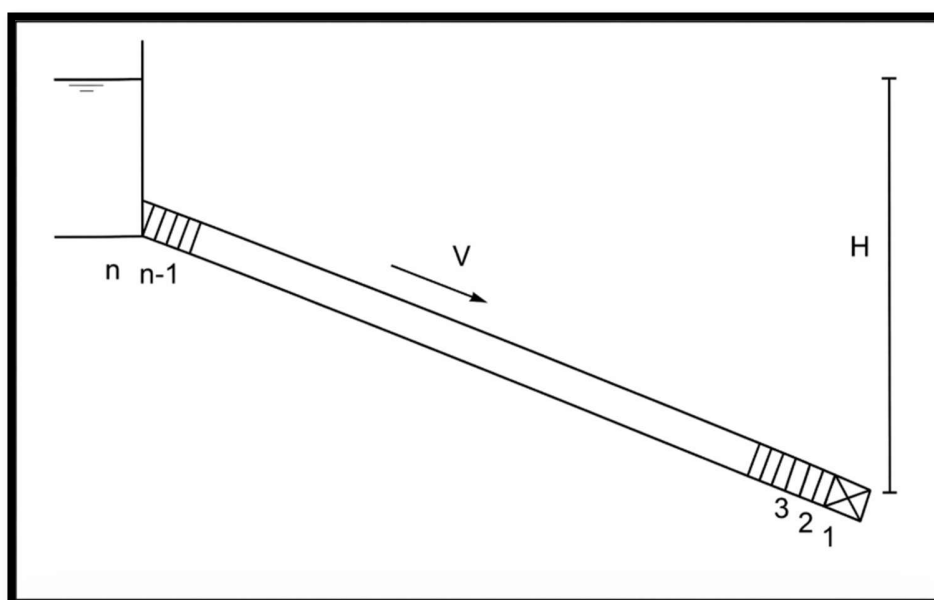


Imagen 1. Idealización del golpe de ariete.

Tomado de: Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados, por R. López Cualla, 1995

Variación de presión (ΔP)

La variación de presión representa el incremento (o disminución) instantáneo de presión generado por una alteración brusca en el régimen del flujo. Desde el punto de vista físico, este incremento es consecuencia directa de la transformación de energía cinética en energía de presión cuando el fluido es forzado a desacelerarse rápidamente.

Cuando una válvula se cierra súbitamente, el fluido que se desplaza con determinada velocidad no puede detenerse de manera inmediata debido a su inercia. Esto provoca una compresión local del fluido y una expansión radial de la tubería, generando una onda de presión que se propaga aguas arriba. Según Joukowski, la magnitud de esta sobrepresión es proporcional a la velocidad de cambio del flujo.

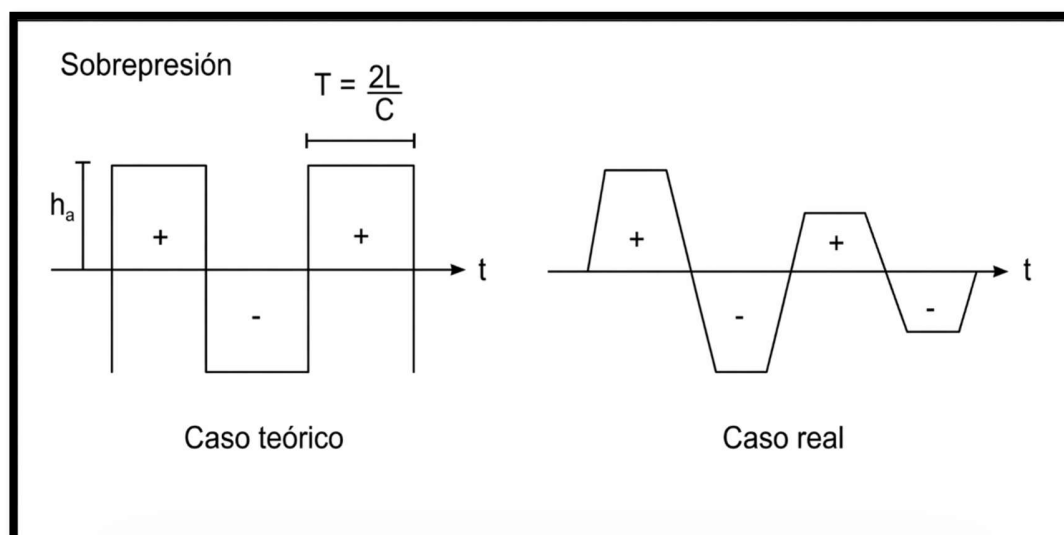


Imagen 2. Diagrama de sobrepresión y depresión, para casos teóricos y reales.
Tomado de: Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados, por R. López Cualla, 1995

En términos estructurales, ΔP es el parámetro más crítico, ya que determina las tensiones circunferenciales en la tubería y, por tanto, el riesgo de falla por sobrepresión (Wylie & Streeter, 1993).

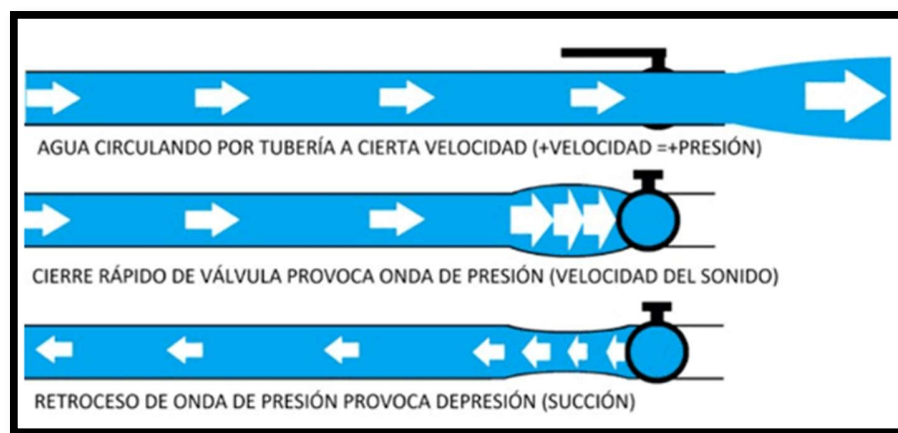


Imagen 3. Representación del golpe de ariete.

Tomado de: ¿Cómo evitar el golpe de ariete en instalaciones sanitarias?, por KIN Energy, 2025, <https://www.kin.energy/blogs/post/%C2%BF%C3%B3mo-evitar-el-golpe-de-ariete-en-instalaciones-sanitarias>

Densidad del fluido (ρ)

La densidad es una propiedad intrínseca del fluido que expresa la relación entre su masa y su volumen (kg/m^3). En el contexto del golpe de ariete, la densidad influye directamente en la cantidad de movimiento que posee el fluido.

Desde la segunda ley de Newton aplicada a un volumen de control, puede entenderse que cuanto mayor es la masa del fluido en movimiento (mayor densidad), mayor será la fuerza necesaria para detenerlo. Por lo tanto, fluidos más densos generan mayores incrementos de presión ante una misma variación de velocidad.

En sistemas de abastecimiento de agua, donde $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$, el efecto es considerable; en cambio, en fluidos compresibles como gases, la respuesta transitoria es diferente debido a su menor densidad y mayor compresibilidad (Chaudhry, 2014).

Velocidad de propagación de la onda (c)

La velocidad de onda representa la rapidez con la que la perturbación de presión se transmite a lo largo de la conducción. Este parámetro no corresponde a la velocidad del flujo, sino a la velocidad de transmisión de la energía mecánica dentro del sistema fluido–tubería.

Su valor depende de:

- La compresibilidad del fluido
- El módulo de elasticidad del material de la tubería
- El diámetro y espesor de la conducción

Para una tubería elástica, puede expresarse como:

$$c = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{ecuación 2})$$

En donde: c = celeridad de la onda (m/s)

D = diámetro del tubo (m)

e = espesor de la pared del tubo (m)

k = relación entre el módulo de elasticidad del agua y el del material de la tubería

Físicamente, cuanto más rígido sea el sistema (fluido poco compresible y tubería con alto módulo de elasticidad), mayor será la velocidad de propagación y, en consecuencia, mayor el pico de presión generado. Por eso, tuberías de acero presentan ondas más severas que tuberías de PVC.

Este aspecto es ampliamente desarrollado en la teoría de transitorios hidráulicos (Chaudhry, 2014).

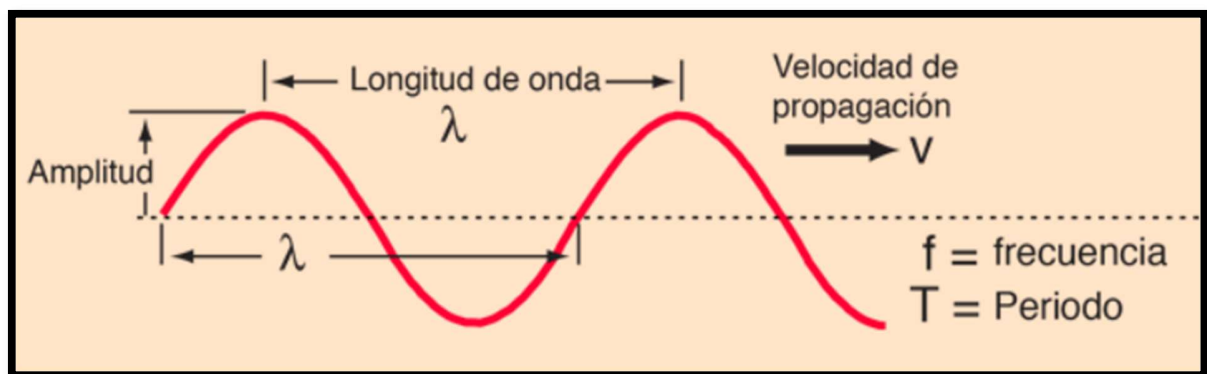


Imagen 4. Propagación de onda.

Tomado de: Wave Relationships, por HyperPhysics, s.f., <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html>

Variación de velocidad (ΔV)

La variación de velocidad es el factor detonante del fenómeno. Representa el cambio abrupto entre la velocidad inicial del flujo y la velocidad final tras la maniobra (cierre de válvula, parada de bomba, ruptura de línea, etc.).

Desde la formulación original de Joukowsky, la ecuación asume un cierre instantáneo (tiempo de cierre menor que el tiempo crítico $2L/c$), lo que genera el máximo incremento de presión posible.

Si la variación de velocidad ocurre gradualmente (cierre lento), la magnitud del golpe disminuye significativamente. Por esta razón, en diseño hidráulico se emplean válvulas de cierre controlado y dispositivos de alivio de presión.

En términos energéticos, ΔV representa la fracción de energía cinética que se transforma en energía elástica del sistema

Interpretación integral del fenómeno

La ecuación de Joukowsky demuestra que el golpe de ariete es esencialmente un fenómeno de conservación de cantidad de movimiento en un medio elástico. El incremento de presión es directamente proporcional:

- A la masa del fluido (ρ),
- A la rigidez del sistema (c),
- Y a la brusquedad de la maniobra (ΔV).

Por tanto, el fenómeno no depende únicamente del caudal, sino del carácter dinámico del cambio en el régimen del flujo.

Los transitorios hidráulicos, o golpe de ariete, representan un aspecto crítico en el diseño, operación y mantenimiento de diversos sistemas hidráulicos: acueductos, redes de distribución, estaciones de bombeo, sistemas de riego e instalaciones industriales, entre otros. Considerarlos adecuadamente permite anticiparse a problemas graves como daños estructurales, fugas, roturas, fenómenos de cavitación y fallos en los equipos.

Más allá de reconocer su existencia, resulta fundamental analizar estos transitorios teniendo en cuenta las condiciones reales del sistema: el tipo de tubería, los materiales empleados, el comportamiento de la fricción, la elasticidad de los conductos y las maniobras operativas que se ejecutan habitualmente. Solo así es posible dimensionar de manera apropiada las medidas de mitigación necesarias, como válvulas de alivio, chimeneas de equilibrio, tanques amortiguadores, dispositivos de aireación o protocolos de control de maniobras (Chaudhry, 2014).

En este contexto, el software Allievi está diseñado específicamente para resolver transitorios hidráulicos en condiciones reales. Permite modelar con precisión aspectos como la geometría de las tuberías, las propiedades de los materiales, el comportamiento de válvulas y bombas, las maniobras operativas, los elementos de control, la fricción y la elasticidad del sistema, entre otros factores. Gracias a esta capacidad de representación detallada, el programa ofrece resultados

confiables que sirven de base para el diseño, la operación segura y la implementación de estrategias efectivas de mitigación (Wylie & Streeter, 1993).

Se trata de una herramienta especializada en el análisis de transitorios hidráulicos que destaca por su interfaz intuitiva, la cual facilita el modelado de sistemas complejos. Entre sus funcionalidades principales se encuentran la definición geométrica de las tuberías, la caracterización del fluido y los materiales del sistema, la configuración detallada de válvulas, bombas y elementos de control, así como la simulación de diferentes maniobras operativas. Además, permite visualizar los resultados tanto de forma gráfica como numérica, lo que facilita su interpretación y análisis.

Este programa es ampliamente utilizado por ingenieros de acueductos, consultores especializados en hidráulica y entidades de diseño que buscan prevenir daños en sus instalaciones y optimizar la operación de sistemas presurizados.

8.2 VÁLVULAS EN SISTEMAS HIDRÁULICOS PRESURIZADOS

Las válvulas cumplen un papel esencial dentro de los sistemas hidráulicos presurizados, pues permiten regular, dirigir o detener el flujo según las necesidades operativas. Aunque a simple vista parecen elementos de control rutinario, su funcionamiento tiene un impacto directo en la estabilidad del sistema. De hecho, una parte importante de los transitorios hidráulicos se origina precisamente en la forma como estas válvulas son operadas.

Cuando una válvula se cierra o se abre demasiado rápido, el flujo dentro de la tubería no alcanza a adaptarse de manera gradual. El agua, al tener masa e inercia, intenta mantener su movimiento, y es en ese choque entre lo que el sistema “quiere seguir haciendo” y lo que la válvula le impone donde nace el golpe de ariete. En términos simples, el fluido se ve obligado a desacelerar bruscamente, y esa desaceleración genera una onda de presión que viaja por la tubería.

Este comportamiento tiene una explicación física clara: al detenerse súbitamente el flujo, la energía cinética del agua se transforma en energía de presión. La magnitud de esa sobrepresión depende tanto de la velocidad inicial del fluido como de la rapidez con la que se ejecuta la maniobra.

Como señala Chaudhry (2014), cuanto más abrupto es el cierre, mayor será la onda de presión que se genera. Además, la velocidad con la que esta onda se propaga está determinada por las propiedades del fluido y por la elasticidad del material de la tubería, lo que explica por qué algunos sistemas son más sensibles que otros a este tipo de eventos.

8.2.1 TIPOS DE VÁLVULAS Y SU FUNCION

Cada tipo de válvula tiene un comportamiento hidráulico particular que afecta la forma en que se genera y disipa la onda de presión.

8.2.1.1 Válvulas de compuerta

- Son de apertura total y baja pérdida de carga en régimen permanente.
- Su cierre suele ser lento, pero si se opera de forma rápida puede generar sobrepresiones significativas.
- No están diseñadas para regulación fina, por lo que su uso en maniobras transitorias debe ser controlado.



Imagen 5. Válvula de compuerta.

Tomado de: Válvula de compuerta, por Mangueras y Bandas, s.f., <https://manguerasybandas.com/producto/valvula-de-compuerta/>

8.2.1.2 Válvulas de mariposa

- Tienen un comportamiento más sensible a la posición del disco.
- Pequeños cambios en el ángulo pueden producir variaciones importantes en el caudal.
- Son comunes en acueductos y estaciones de bombeo, donde su operación debe ser cuidadosamente programada para evitar transitorios severos.



Imagen 6. Válvula de mariposa.

Tomado de: Válvula de mariposa tipo wafer, por Tuvalrep, s.f., <https://tuvalrep.com.co/producto/valvula-de-mariposa-tipo-wafer/>

8.2.1.3 Válvulas de globo

- Permiten una regulación más precisa del flujo.
- Su diseño favorece cierres más controlados, reduciendo la magnitud del golpe de ariete.
- Son frecuentes en sistemas donde se requiere modulación continua.



Imagen 7. Válvula de globo.

Tomado de: Válvula globo acero carbón flanchada, por Tuvalrep, s.f., <https://tuvalrep.com.co/producto/valvula-globo-acero-carbon-flanchada/>

8.2.1.4 Válvulas de check o de retención

- Evitan el flujo inverso.
- Su cierre automático puede ser extremadamente rápido, especialmente ante una parada de bomba.
- Este cierre súbito es una de las causas más comunes de sobrepresiones y cavitación en estaciones de bombeo.



Imagen 8. Válvula de check.

Tomado de: Válvula de retención de bola bridada GAER PN16, por Hidroglobal, s.f., <https://www.hidroglobal.com/catalogo-de-producto/valvula-de-retencion-de-bola-bridada-gaer-pn16/>

8.2.1.5 Válvulas de alivio y protección

Incluyen:

- Válvulas de alivio de presión
- Válvulas anticipadoras
- Válvulas de aire

Su función es mitigar el golpe de ariete, permitiendo liberar presión o introducir aire para amortiguar la onda.

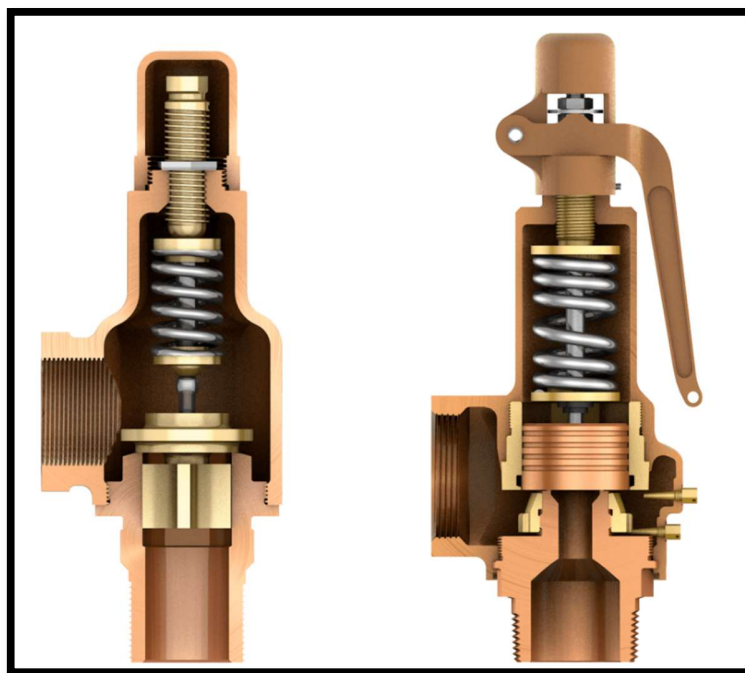


Imagen 9. Válvula de alivio.

*Tomado de: Válvulas de alivio: cómo y cuándo usarlas, por Grupo Hidráulica, 2023,
<https://grupohidraulica.com/noticias/2023/04/05/valvulas-de-alivio-como-y-cuando-usarlas/>*

TIPO DE VÁLVULA	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES	IMPACTO EN EL GOLPE DE ARIETE
Compuerta	Cierre lineal; permite apertura total del conducto.	• Muy baja pérdida de carga. • Ideal para aislamiento.	• No apta para regulación. • Cierres rápidos generan sobrepresiones altas.	Alto si se opera bruscamente; genera variaciones repentinas de velocidad.
Mariposa	Disco giratorio que regula el paso del flujo	• Compacta y económica. • Permite regulación moderada.	• Sensible a la posición del disco. • Pérdidas mayores que la compuerta.	Moderado–alto: pequeños cambios en el ángulo pueden alterar el caudal rápidamente.
Globo	Válvula de regulación con trayectoria interna controlada.	• Excelente control del caudal. • Maniobras suaves.	• Mayor pérdida de carga. • Más costosa.	Bajo: su diseño favorece cierres graduales que reducen el golpe.

Check (retención)	Cierra automáticamente para evitar flujo inverso	• Protege bombas y equipos. • No requiere operación manual.	• Cierre extremadamente rápido. • Riesgo de golpe por inversión de flujo	Muy alto: una de las principales fuentes de sobrepresión en estaciones de bombeo.
Alivio de presión	Se abre cuando la presión supera un valor límite.	• Protege contra sobrepresiones. • Reduce picos de presión.	• Requiere calibración precisa. • Puede generar oscilaciones si está mal ajustada.	Mitigador: libera presión durante el transitorio.

Tabla 1. Clasificación de válvulas en sistemas hidráulicos presurizados y su impacto en el golpe de ariete.
Elaboración propia.

Importancia en ingeniería civil

El análisis de transitorios hidráulicos es parte esencial de:

Área de aplicación	Riesgos si no se controla
Acueductos y distribución	Roturas de tuberías, fugas, cavitación
Estaciones de bombeo	Daños en bombas y accesorios
Plantas de riego	Golpes de presión que afectan operación
Centrales hidroeléctricas	Problemas en compuertas y turbinas

Tabla 2. Riesgos asociados al golpe de ariete por área de aplicación en ingeniería civil.
Elaboración propia.

CATEGORÍA	BUENAS PRACTICAS RECOMENDADAS
Acueductos y distribución urbana	Previene roturas de tuberías, reduce pérdidas y mejora la confiabilidad del sistema
Estaciones de bombeo	Permite evaluar arranques y paradas, evitando sobrepresiones que dañen equipos.
Centrales hidroeléctricas	Controla fenómenos críticos en turbinas y conductos forzados, protegiendo infraestructura.
Sistemas industriales	Garantiza operación segura en procesos que requieren transporte de fluidos a presión
Sistemas de riego	Evita fallas en tuberías largas y expuestas a variaciones de operación.
Diseño y mantenimiento	Optimiza costos, prolonga la vida útil y permite tomar decisiones basadas en criterios técnicos.

Tabla 3. Relevancia del análisis transitorio en la ingeniería civil.
Elaboración propia.

8.3 ENVOLVENTE DE PRESIONES EN EL ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE

En el análisis de transitorios hidráulicos, la envolvente de presiones corresponde a la representación gráfica de los valores máximos y mínimos de presión que se presentan en cada punto de un sistema de conducción durante un evento transitorio. A diferencia de las curvas temporales de presión, que describen la evolución del fenómeno en un punto específico a lo largo del tiempo, la envolvente resume los valores extremos alcanzados en toda la red durante la ocurrencia del fenómeno.

La envolvente se construye a partir del análisis completo del comportamiento transitorio del sistema, considerando la propagación de ondas de presión generadas por cambios súbitos en las condiciones de operación, como el cierre de válvulas, el arranque o paro de bombas, o variaciones bruscas en el caudal. Dichas ondas se propagan a lo largo de la tubería, reflejándose en los extremos del sistema y generando oscilaciones de presión que pueden superar ampliamente las condiciones normales de operación.

En este contexto, se distinguen generalmente dos curvas principales: la envolvente máxima, que representa los mayores valores de presión alcanzados durante el transitorio, y la envolvente mínima, que indica los valores más bajos registrados. El análisis conjunto de ambas permite identificar zonas críticas del sistema susceptibles a sobrepresión o subpresión.

La envolvente es fundamental porque:

- Permite identificar puntos críticos de sobrepresión.
- Permite detectar zonas donde puede ocurrir subpresión o cavitación.
- Es la base para el diseño estructural de la tubería.
- Se usa para verificar si la presión supera la presión nominal (PN) del sistema.

8.3.1 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA

El fenómeno del golpe de ariete se describe a partir de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento aplicadas al flujo no permanente en tuberías presurizadas. Una de las formulaciones fundamentales para estimar la variación de presión asociada a cambios bruscos de velocidad fue establecida por Nikolay Zhukovsky, quien propuso la relación conocida como ecuación de Joukowsky:

$$\Delta P = \rho a \Delta V \quad (\text{ecuación 3})$$

donde:

- ΔP es el incremento de presión generado,
- ρ es la densidad del fluido,
- a es la velocidad de propagación de la onda de presión,
- ΔV es la variación de velocidad del flujo.

Esta ecuación permite estimar el incremento instantáneo de presión generado por un cierre rápido de válvula. Sin embargo, en sistemas reales el fenómeno es más complejo debido a la interacción entre la elasticidad del fluido, la deformación de la tubería, las pérdidas por fricción y las reflexiones de ondas en los límites del sistema.

Por esta razón, el análisis completo del régimen transitorio se realiza mediante métodos numéricos como el método de las características, ampliamente desarrollado en estudios modernos de hidráulica transitoria, como los presentados por Martin H. Chaudhry. Este método permite transformar las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo no permanente en ecuaciones algebraicas que pueden resolverse de forma iterativa a lo largo del sistema.

A partir de la simulación temporal obtenida mediante estos modelos, es posible determinar los valores máximos y mínimos de presión en cada punto de la tubería, lo que permite construir la envolvente de presiones del sistema.

8.3.2 IMPORTANCIA EN EL DISEÑO HIDRAULICO

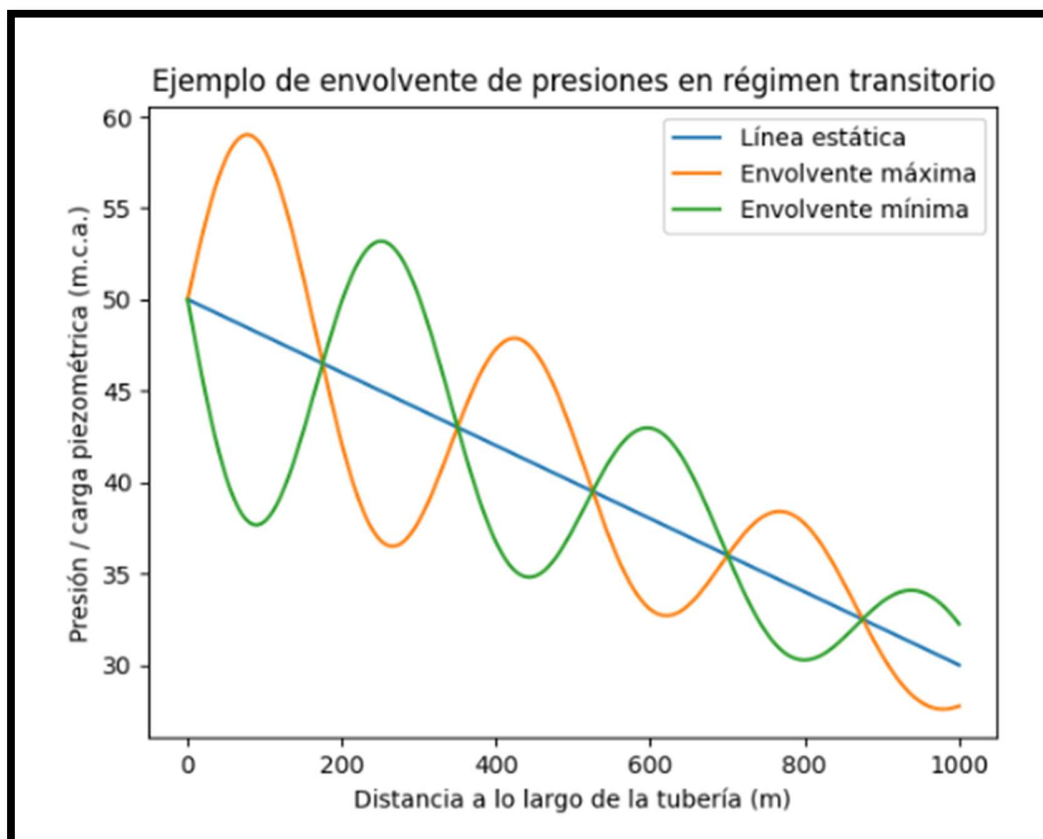
La envolvente de presiones constituye una herramienta fundamental en el diseño y evaluación de sistemas de conducción presurizados, ya que permite identificar las condiciones extremas de presión que pueden presentarse durante eventos transitorios.

En el diseño hidráulico, no basta con analizar únicamente las condiciones de operación en régimen permanente. Los fenómenos transitorios pueden generar sobrepresiones significativamente mayores a las presiones normales de operación, lo que puede ocasionar fallas estructurales en tuberías, accesorios y equipos hidráulicos.

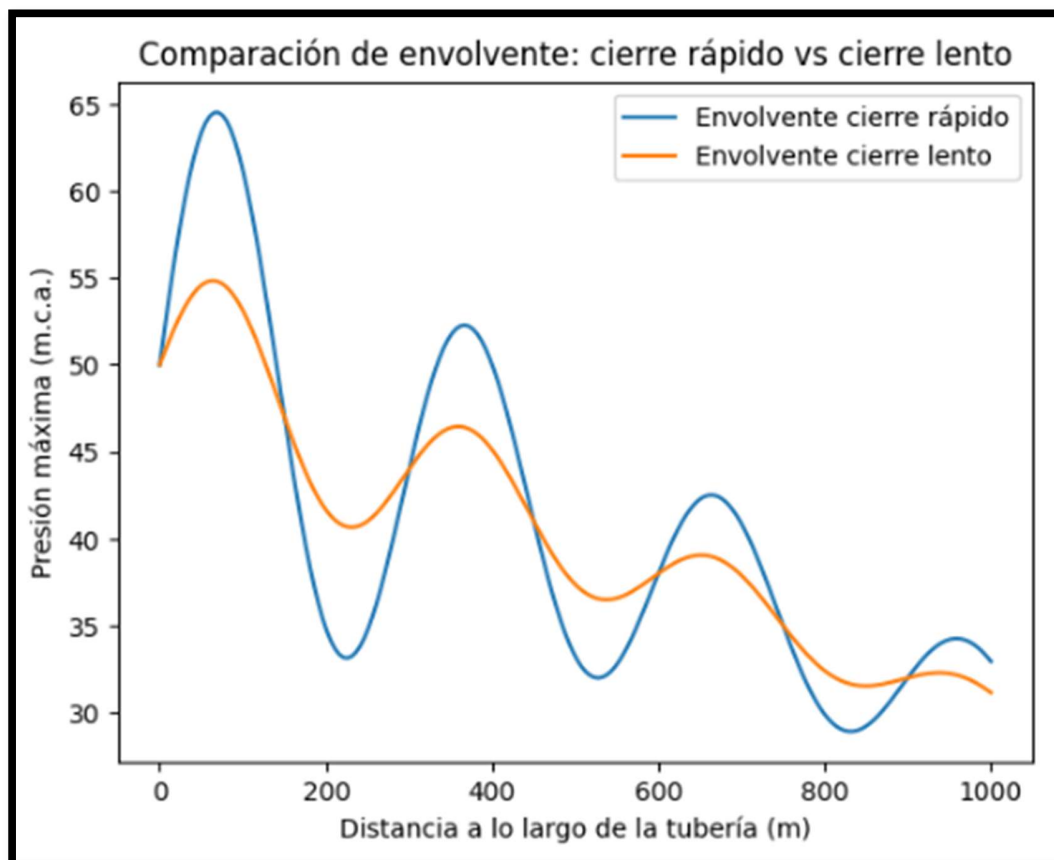
La envolvente máxima permite verificar que las presiones generadas durante el transitorio no superen la presión admisible del sistema o la clase de presión nominal (PN) de las tuberías. En caso de que se identifiquen valores superiores a los límites admisibles, es necesario implementar medidas de mitigación, tales como el ajuste de tiempos de cierre de válvulas, la instalación de dispositivos de alivio de presión o la selección de tuberías de mayor resistencia.

Por otra parte, la envolvente mínima permite identificar condiciones de subpresión que podrían provocar cavitación o separación de columna, fenómenos que también pueden comprometer la integridad del sistema hidráulico.

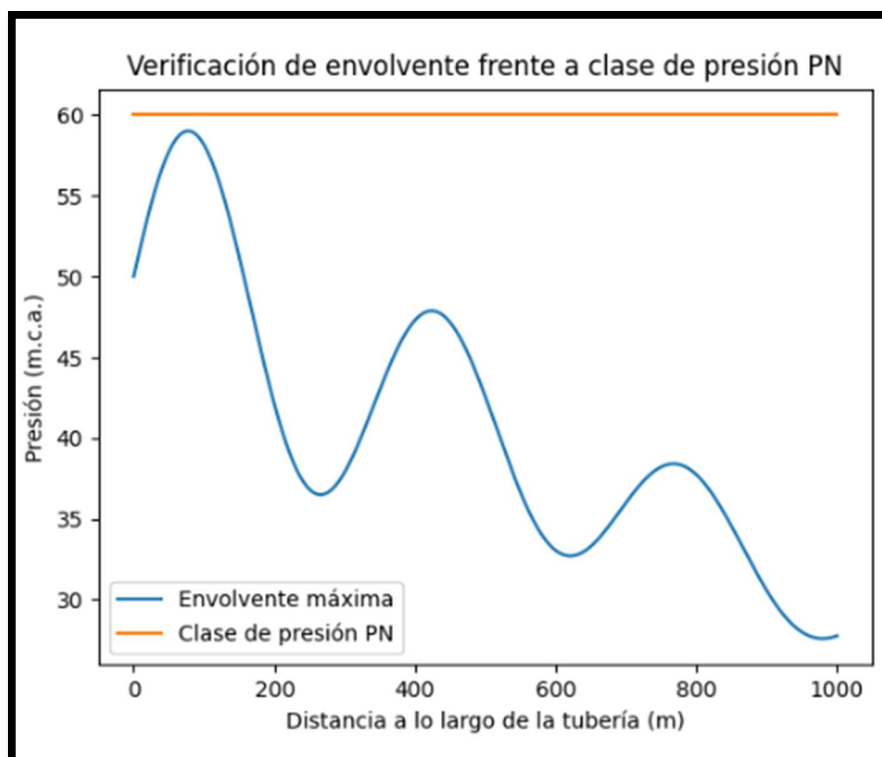
En consecuencia, el análisis de la envolvente de presiones permite evaluar el comportamiento estructural del sistema frente a eventos transitorios y constituye un criterio fundamental para la selección adecuada de materiales y dispositivos de protección.



Gráfica 1. Representación de la envolvente máxima y mínima de presiones generadas durante un evento transitorio
La línea estática corresponde al régimen permanente del sistema.
Elaboración propia.



Gráfica 2. Comparación de envoltentes de presión para diferentes tiempos de cierre de válvula.
Elaboración propia.



Gráfica 3. Verificación de la envolvente de presión respecto a la presión nominal de la tubería.
Elaboración propia.

8.3.1 ENVOLVENTE MAXIMA Y MINIMA

ENVOLVENTE	DESCRIPCION
Máxima	Indica las mayores sobrepresiones → riesgo estructural
Mínima	Indica las menores presiones → riesgo de cavitación o separación de columna

Tabla 4. Envolvente Máxima y Mínima.
Elaboración propia.

9. METODOLOGÍA

Enfoque metodológico

El trabajo adopta un enfoque descriptivo y aplicado, ya que combina principios teóricos con la simulación computacional para estudiar el golpe de ariete en sistemas hidráulicos reales o que representan condiciones típicas de operación.

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo–aplicado, orientado a la construcción de un manual académico que facilite el aprendizaje del software Allievi en el análisis de transitorios hidráulicos. El estudio combina la revisión conceptual del fenómeno del golpe de ariete con la experimentación mediante simulaciones numéricas, integrando teoría y práctica para producir un recurso didáctico útil en el ámbito universitario.

El enfoque aplicado se justifica en la naturaleza del producto final: un manual operativo que requiere comprender, probar y documentar las funcionalidades del software a partir de casos reales y condiciones representativas de sistemas hidráulicos presurizados.

9.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño metodológico se estructuró en cuatro fases principales, cada una con actividades específicas que permitieron avanzar progresivamente hacia la elaboración del manual:

Fase	Actividades	Producto
I. Revisión teórica	Búsqueda de literatura y normativa, consolidación del marco conceptual	Marco Teórico
II. Estudio detallado del software Allievi	Definición del sistema de tuberías, parámetros hidráulicos, maniobras y elementos de control	Modelo base en Allievi
III. Simulaciones y análisis	Ejecución de escenarios, comparación de resultados y evaluación de medidas de mitigación	Resultados y recomendaciones
IV. Análisis e interpretación de resultados	Interpretación técnica de los resultados obtenidos, formulación de lineamientos y estructuración del manual de aplicación	Manual para el análisis del golpe de ariete

Tabla 5. Metodología de Investigación.
Elaboración propia.

Esta investigación se desarrolla en cuatro fases clave. En la primera, se asientan los conceptos técnicos esenciales sobre los transitorios hidráulicos. En la segunda, el proyecto traslada estos conceptos a un modelo digital en Allievi, definiendo la infraestructura del sistema. La tercera fase consiste en someter dicho modelo a múltiples simulaciones de maniobras operativas. El cierre del proceso integra los datos obtenidos para generar lineamientos técnicos y un manual de mitigación orientado a proteger el sistema hidráulico.

10.GENERALIDADES DEL SOFTWARE ALLIEVI

El software Allievi es una herramienta especializada en el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas presurizados. Su principal aplicación es la simulación del golpe de ariete, utilizando el método de las características para representar con precisión cómo responde una red de tuberías ante maniobras operativas como el cierre de una válvula o la parada de una bomba.

El programa permite definir con detalle los elementos fundamentales del sistema, entre ellos:

- La geometría de las conducciones
- Las propiedades hidráulicas del fluido
- Las características mecánicas del material de las tuberías
- Elementos de control como válvulas, bombas y dispositivos de protección
- Las maniobras operativas y los escenarios transitorios por evaluar

Gracias a su capacidad de representación matemática y gráfica, Allievi se ha consolidado como una herramienta robusta tanto para el diseño como para la evaluación de la seguridad en sistemas hidráulicos presurizados.

10.1 REQUISITOS TÉCNICOS Y CONFIGURACIÓN INICIAL

Para el desarrollo de este trabajo se empleó la versión académica de Allievi instalada en un entorno Windows. Los requisitos mínimos recomendados son:

- Windows 10 o superior
- Procesador de arquitectura x64
- 8 GB de memoria RAM como mínimo
- 2 GB de espacio libre en disco

Una vez instalado el software, es necesario realizar una configuración inicial que incluye:

1. Crear un nuevo proyecto
2. Seleccionar las unidades de trabajo (se recomienda el Sistema Internacional)
3. Configurar los parámetros generales de cálculo
4. Guardar el archivo base antes de iniciar la modelación

Definir correctamente las unidades desde el inicio es fundamental, ya que cualquier inconsistencia puede generar errores importantes en los resultados.

10.2 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DEL PROGRAMA

La interfaz principal de Allievi está organizada en diferentes áreas que facilitan la construcción del modelo y el análisis de los resultados.

Área de modelación gráfica: En este espacio se construye el esquema del sistema hidráulico. Aquí se insertan los elementos principales:

- Tuberías
- Nodos
- Válvulas
- Bombas
- Depósitos
- Dispositivos de protección

La representación es esquemática, pero permite visualizar de manera clara la configuración general del sistema.

Panel de propiedades: Al seleccionar cualquier elemento del modelo, se despliega un panel donde se ingresan sus parámetros hidráulicos y geométricos, tales como:

- Longitud
- Diámetro
- Espesor
- Rugosidad
- Módulo de elasticidad

- Condiciones iniciales de flujo

Una correcta definición de estos parámetros es esencial para obtener resultados confiables.

Barra de herramientas: Desde esta barra es posible

- Insertar nuevos elementos
- Editar propiedades
- Definir maniobras operativas
- Ejecutar simulaciones
- Visualizar resultados en forma gráfica o numérica

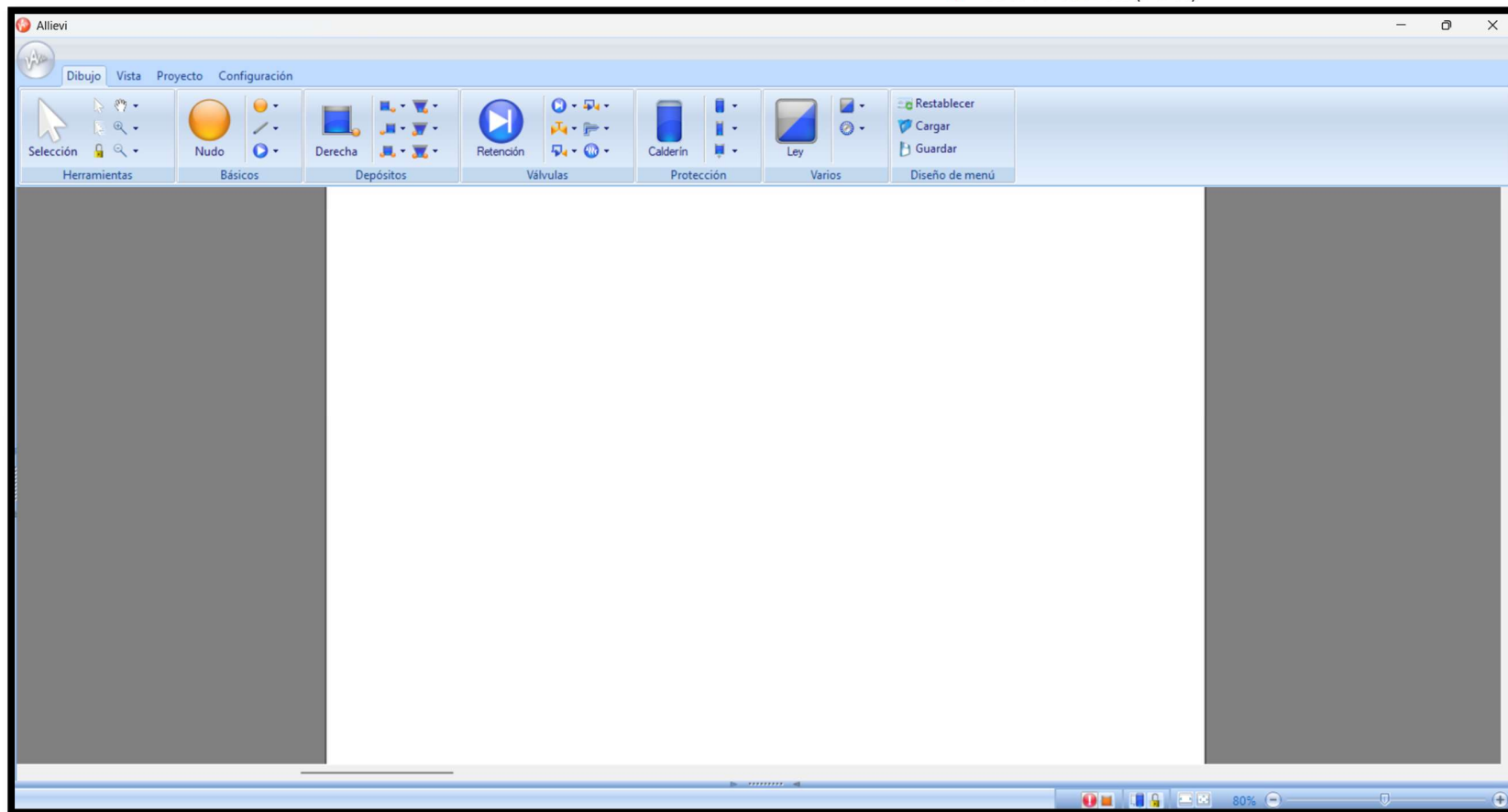


Imagen 10. Interfaz del software Allievi. Captura de pantalla tomada de Allievi (versión académica).

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Propósito principal	Simular transitorios hidráulicos en sistemas presurizados mediante el Método de las Características.
Tipo de sistemas que modela	Redes de tuberías a presión con válvulas, bombas, turbinas, bifurcaciones y elementos especiales.
Eventos transitorios que permite analizar	Cierre/apertura de válvulas, arranques y paradas de bombas, fallas eléctricas, cavitación, sobrepresiones y depresiones.
Entradas requeridas	Geometría de la red, propiedades del fluido, características de la tubería, condiciones iniciales y maniobras.
Salidas generadas	Gráficos de presión y caudal, tablas de resultados, perfiles temporales y espaciales del transitorio.
Ventajas educativas	Facilita la comprensión del comportamiento dinámico del flujo, permite visualizar ondas de presión y relacionar teoría con práctica.

Tabla 6. Capacidades y enfoque del software Allievi.
Elaboración propia.

10.3 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO BASE PASO A PASO

Para ilustrar el uso del software, se presenta la construcción de un modelo sencillo compuesto por una tubería sometida al cierre rápido de una válvula.

10.3.1 Definición del sistema

El sistema considerado está compuesto por:

- Un depósito aguas arriba
- Una tubería de longitud L
- Una válvula ubicada en el extremo aguas abajo

Los parámetros iniciales:

- Longitud
- Diámetro interno
- Material
- Velocidad inicial del flujo

10.3.2 Ingreso de datos

Los pasos para construir el modelo son:

1. Insertar el depósito inicial
2. Añadir la tubería y definir sus propiedades físicas
3. Incorporar la válvula en el extremo final
4. Configurar la maniobra de cierre rápido (tiempo de cierre menor al tiempo crítico)

10.3.3 Configuración del cálculo

Se deben establecer:

- Tiempo total de simulación
- Paso de cálculo
- Número de intervalos espaciales
- Condiciones iniciales de presión y caudal

Es importante verificar que el paso temporal cumpla con los criterios de estabilidad del método numérico utilizado.

10.4 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Una vez definido el modelo:

- Se ejecuta el análisis transitorio
- Se verifica que no existan errores de configuración
- Se generan los gráficos de presión vs. tiempo
- Se analizan los resultados en los puntos críticos del sistema

El software permite observar:

- La presión máxima alcanzada
- La presión mínima registrada
- La evolución temporal de la onda de presión
- Posibles condiciones de cavitación

10.5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de los resultados debe incluir:

- Comparación con la ecuación clásica de Allievi
- Identificación de sobrepresiones críticas
- Verificación de presiones por debajo de la presión de vapor
- Evaluación del factor de seguridad del sistema

El análisis no debe limitarse a los valores máximos de presión; también es importante revisar la frecuencia de oscilación, el amortiguamiento y la estabilidad general del sistema.

10.6 BUENAS PRÁCTICAS DE MODELACIÓN

Para garantizar resultados confiables se recomienda:

- Utilizar datos reales o técnicamente justificados
- Definir correctamente las propiedades elásticas del material
- Ajustar adecuadamente el número de tramos de discretización
- Verificar la coherencia de unidades
- Comparar los resultados con cálculos teóricos preliminares
- Documentar cada escenario de simulación

10.7 ERRORES COMUNES EN LA MODELACIÓN

Entre los errores más frecuentes se encuentran:

- Definir tiempos de cierre poco realistas
- No considerar la elasticidad de la tubería
- Ingresar valores inconsistentes de rugosidad
- No revisar las condiciones iniciales de presión
- Utilizar pasos de tiempo demasiado grandes

Evitar estos errores permite que la simulación represente de manera más fiel el comportamiento real del sistema.

CATEGORÍA	BUENAS PRACTICAS RECOMENDADAS
Definición del sistema	Representar fielmente la geometría, longitudes, diámetros, rugosidades y accesorios.
Propiedades del fluido y la tubería	Verificar densidad, módulo de elasticidad, celeridad y condiciones de anclaje.
Condiciones iniciales	Asegurar que el régimen permanente esté correctamente calculado antes de simular el transitorio.
Configuración numérica	Seleccionar discretización adecuada, tiempos de cálculo coherentes y evitar mallas inestables.
Validación de resultados	Comparar con teoría (Joukowsky, celeridad), revisar coherencia física y detectar valores no realistas.
Análisis de escenarios	Evaluar maniobras críticas, fallas posibles y condiciones extremas para garantizar seguridad del sistema.

Tabla 7. Buenas prácticas recomendadas en la modelación de transitorios hidráulicos con Allievi.
Elaboración propia.

11.RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de transitorios hidráulicos para dos configuraciones de sistema: conducción por gravedad y sistema impulsado por bombeo. Los resultados incluyen la comparación entre los valores teóricos calculados mediante la ecuación de Joukowski y los valores obtenidos mediante simulación numérica en el software Allievi, así como la evaluación del riesgo de cavitación y la efectividad de medidas de mitigación.

11.1 Caso 1: Sistema por gravedad

Análisis teórico

Para el sistema por gravedad, con una longitud de 800 m, diámetro de 150 mm y velocidad inicial de 1.2 m/s, se determinó una sobrepresión teórica utilizando la ecuación de Joukowski:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V$$

Obteniéndose:

$$\Delta P = 1000 \cdot 350 \cdot 1.2 = 420,000 \text{ Pa} = 420 \text{ kPa} \equiv 42.8 \text{ m.c.a.}$$

El tiempo crítico del sistema fue calculado como:

$$T = \frac{2L}{c} = 4.57 \text{ s}$$

Dado que el tiempo de cierre considerado (0.5 s) es significativamente menor que el tiempo crítico, se espera la ocurrencia de un transitorio severo.

Resultados de simulación

La simulación en Allievi permitió obtener los siguientes resultados:

- Sobrepresión máxima: 389 kPa (39.7 m.c.a.)
- Diferencia respecto al valor teórico: 7.4%
- Presión mínima registrada: -28 kPa
- Periodo de oscilación: 4.57 s

La diferencia entre el resultado teórico y el simulado se mantiene por debajo del 10%, lo cual valida la consistencia del modelo numérico. Esta discrepancia se atribuye principalmente a la inclusión de pérdidas por fricción distribuida y al esquema de discretización empleado.

La presión mínima negativa indica la posibilidad de presiones subatmosféricas; sin embargo, el nivel alcanzado sugiere un riesgo bajo de cavitación, sin evidencia de separación significativa de columna.

Evaluación estructural

Considerando una tubería de PVC con presión nominal (PN) de 630 kPa, la sobrepresión máxima simulada no supera la capacidad resistente del material, presentando un margen de seguridad aproximado del 38%. Esto indica que, desde el punto de vista estructural, el sistema es estable ante el escenario analizado.

Análisis de medidas de mitigación

Se evaluó la implementación de un cierre lento de válvula (6 s), superior al tiempo crítico del sistema. Los resultados muestran:

- Sobrepresión máxima: 198 kPa
- Reducción: 49% respecto al cierre rápido

Este resultado confirma que el control del tiempo de maniobra es una estrategia altamente efectiva para mitigar transitorios en sistemas por gravedad, reduciendo significativamente las sobrepresiones generadas.

11.2 Caso 2: Sistema por bombeo

Análisis teórico

Para el sistema impulsado por bombeo, con longitud de 600 m, diámetro de 100 mm y velocidad inicial de 1.8 m/s, la sobrepresión teórica calculada fue:

$$\Delta P = 1000 \cdot 330 \cdot 1.8 = 594,000 \text{ Pa} = 594 \text{ kPa} \equiv 60.5 \text{ m. c. a.}$$

El tiempo crítico del sistema se determinó como:

$$T = \frac{2L}{c} = 3.64 \text{ s}$$

La condición de parada súbita de bomba representa un evento altamente transitorio, equivalente a un cierre casi instantáneo del flujo.

Resultados de simulación

Los resultados obtenidos en Allievi son:

- Sobrepresión máxima: 551 kPa (56.2 m.c.a.)
- Diferencia respecto al valor teórico: 7.2%
- Presión mínima registrada: -65 kPa
- Periodo de oscilación: 3.64 s

Al igual que en el caso anterior, la diferencia entre valores teóricos y simulados es menor al 10%, validando el modelo.

No obstante, la presión mínima registrada evidencia un riesgo alto de cavitación, ya que se alcanzan valores suficientemente bajos para inducir separación de columna. Este fenómeno representa el aspecto más crítico del sistema analizado.

Evaluación estructural

La sobrepresión máxima (551 kPa) se encuentra por debajo de la presión nominal de la tubería (630 kPa), pero con un margen de seguridad reducido del 12.5%. Esto implica que el sistema opera cercano a su límite estructural, incrementando su vulnerabilidad ante variaciones operativas o condiciones no consideradas.

Análisis de medidas de mitigación

Se evaluó la incorporación de una válvula de alivio como mecanismo de protección ante transitorios:

- Sobrepresión sin protección: 551 kPa
- Sobrepresión con válvula de alivio: 310 kPa
- Reducción: 44%

La implementación de este dispositivo demuestra ser efectiva en la reducción de sobrepresiones, además de contribuir indirectamente a la mitigación de presiones negativas.

Comparación entre casos

El análisis comparativo entre ambos sistemas permite identificar diferencias clave en su comportamiento hidráulico:

- El sistema por bombeo presenta mayores sobrepresiones, debido a la mayor velocidad inicial.
- El riesgo de cavitación es significativamente más alto en el sistema impulsado, evidenciado por presiones mínimas más negativas.
- El sistema por gravedad muestra un comportamiento más estable, con mayor margen de seguridad estructural.
- Las estrategias de mitigación difieren:
 - En sistemas por gravedad, el control del tiempo de cierre es altamente efectivo.
 - En sistemas por bombeo, es necesario implementar dispositivos de protección, como válvulas de alivio.

Discusión general

Los resultados evidencian que, aunque ambos sistemas cumplen con los límites de presión nominal, el comportamiento dinámico difiere considerablemente. En particular, el sistema por bombeo presenta condiciones más críticas asociadas a la ocurrencia de cavitación y menores márgenes de seguridad.

Asimismo, se confirma que la ecuación de Joukowsky proporciona una estimación adecuada de las sobrepresiones máximas, con diferencias inferiores al 10% respecto a los resultados numéricos obtenidos con Allievi.

Finalmente, se destaca la importancia de considerar medidas de mitigación desde la etapa de diseño, especialmente en sistemas impulsados, donde los efectos transitorios pueden comprometer tanto la integridad estructural como la continuidad del servicio.

11.3 Cierre rápido vs cierre lento

Condiciones del sistema

- Longitud: 500 m
- Diámetro: constante
- Fluido: agua
- Velocidad inicial: 1.5 m/s
- Celeridad: 1000 m/s

Escenario 1: Cierre rápido

- Tiempo de cierre: **0.2 s** (menor al tiempo crítico)
- Resultado:
 - Sobrepresión máxima: **≈ 1.38 MPa**

Escenario 2: Cierre lento

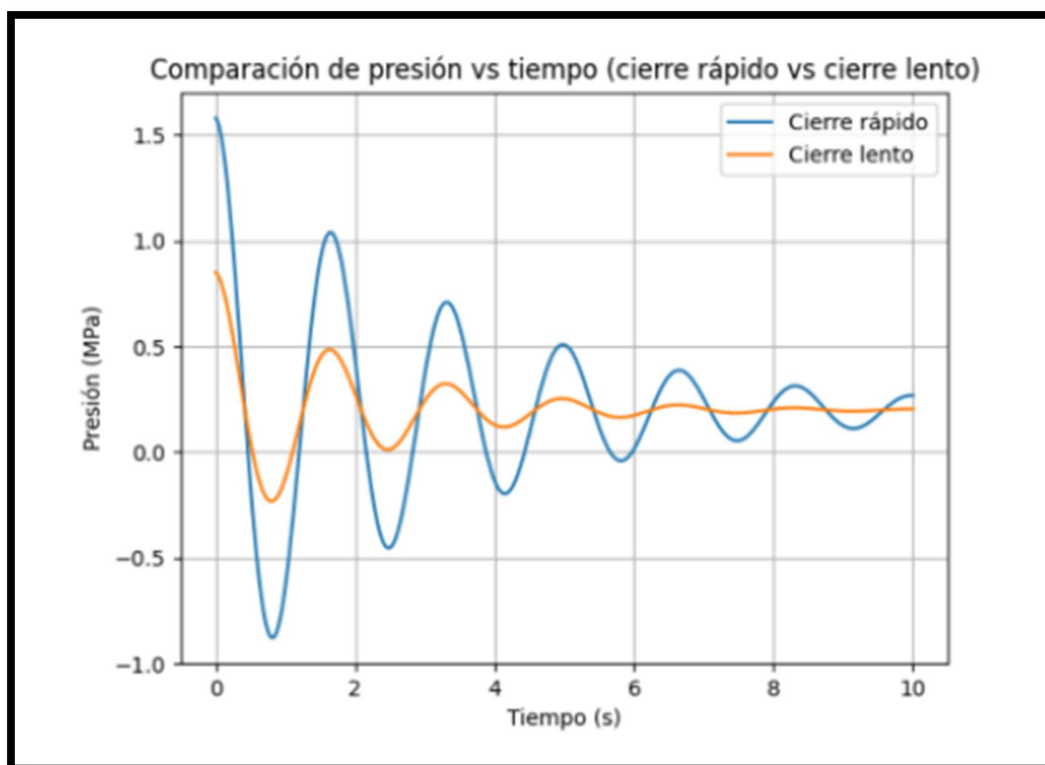
- Tiempo de cierre: **3 s** (mayor al tiempo crítico)
- Resultado:
 - Sobrepresión máxima: **≈ 0.65 MPa**

Escenario	Tiempo de cierre	Sobrepresión (MPa)	Reducción
Cierre rápido	0.2 s	1.38	—
Cierre lento	3 s	0.65	↓ 53 %

Tabla 8. Escenarios de cierre de válvula
Elaboración propia.

El análisis comparativo entre el cierre rápido y el cierre lento evidencia una reducción significativa en la magnitud del golpe de ariete. Mientras que el cierre rápido genera una sobrepresión cercana a 1.38 MPa, el cierre lento reduce este valor aproximadamente en un 53 %, alcanzando 0.65 MPa. Este comportamiento confirma que la rapidez de la maniobra es un factor determinante en la generación del transitorio. Cuando el tiempo de cierre es menor que el tiempo crítico del sistema, la onda de presión alcanza su máxima magnitud, tal como lo predice la teoría de Joukowsky. En contraste, cierres graduales permiten una redistribución progresiva de la energía, disminuyendo la intensidad del fenómeno.

Desde el punto de vista del diseño hidráulico, estos resultados demuestran que el control del tiempo de cierre de válvulas constituye una de las estrategias más efectivas para la mitigación del golpe de ariete, incluso sin necesidad de incorporar dispositivos adicionales de protección. Este resultado pone en evidencia que el golpe de ariete no es únicamente una consecuencia de las condiciones hidráulicas del sistema, sino también de la forma en que este es operado, lo que convierte la gestión de maniobras en un elemento clave de diseño y seguridad.



Gráfica 4. Comparación de la evolución temporal de la presión para un cierre rápido y un cierre lento de válvula. Elaboración propia.

Parámetro	Caso 1 (Gravedad)	Caso 2 (Bombeo)
Sobrepresión teórica	420 kPa	594 kPa
Sobrepresión simulada	389 kPa	551 kPa
Presión mínima	-28 kPa	-65 kPa
Riesgo de cavitación	Bajo	Alto
Margen sobre PN	38%	12.5%
Estrategia de mitigación	Cierre lento	Válvula de alivio

Tabla 9. Comparación de resultados.
Elaboración propia.

- La diferencia entre teórico y simulado (~7%) se explica por la fricción distribuida y la discretización, igual que en el caso base que ya tienes en tu tesis.
- La presión mínima negativa en el Caso 2 es el hallazgo más crítico — indica separación de columna y debe mencionarse con énfasis.
- El margen del 12.5% sobre la PN en el Caso 2 es una señal de alerta: si la velocidad fuera un poco mayor o el PVC tuviera menor clase de presión, el sistema fallaría.

12.CONCLUSIONES

El análisis de transitorios hidráulicos realizado para los sistemas de conducción por gravedad y por bombeo permitió identificar diferencias significativas en su comportamiento dinámico, así como validar la aplicabilidad de modelos teóricos y estrategias de mitigación.

En primer lugar, se comprobó que la ecuación de Joukowsky constituye una herramienta confiable para la estimación de sobrepresiones máximas en sistemas hidráulicos, ya que las diferencias entre los valores teóricos y los obtenidos mediante simulación numérica en Allievi fueron inferiores al 10% en ambos casos. Esto confirma la validez del enfoque teórico como criterio preliminar de diseño.

En cuanto al comportamiento hidráulico, se evidenció que el sistema impulsado por bombeo presenta condiciones más críticas en comparación con el sistema por gravedad. Las mayores velocidades iniciales generan sobrepresiones más elevadas, alcanzando valores cercanos al límite estructural de la tubería, lo que reduce considerablemente el margen de seguridad y aumenta la vulnerabilidad del sistema ante eventos transitorios.

Adicionalmente, el análisis de presiones mínimas mostró que el riesgo de cavitación es significativamente mayor en el sistema por bombeo, debido a la presencia de presiones subatmosféricas más severas. Este fenómeno representa una condición crítica de operación, ya que puede inducir separación de columna y daños estructurales en la conducción.

Por otro lado, el sistema por gravedad presentó un comportamiento más estable, con menores sobrepresiones, presiones mínimas menos críticas y un margen de seguridad estructural considerablemente mayor. Esto sugiere que este tipo de sistemas es intrínsecamente menos susceptible a fallas asociadas a transitorios hidráulicos.

Respecto a las medidas de mitigación, se demostró que el control del tiempo de cierre de válvulas es altamente efectivo en sistemas por gravedad, logrando reducciones cercanas al 50% en la sobrepresión máxima. En contraste, en sistemas por bombeo, la implementación de dispositivos de protección como válvulas de alivio resulta fundamental, alcanzando reducciones del orden del 44% y contribuyendo a disminuir tanto las sobrepresiones como los efectos asociados a la cavitación.

Finalmente, los resultados destacan la importancia de incorporar el análisis de transitorios hidráulicos desde la etapa de diseño, especialmente en sistemas impulsados, donde los efectos del golpe de ariete pueden comprometer tanto la integridad estructural como la continuidad del servicio. La adecuada selección de estrategias de mitigación, junto con la validación mediante herramientas numéricas, constituye un elemento clave para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas de conducción.

13.RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo permitió identificar una serie de aspectos que, de ser abordados en futuras investigaciones o en la continuación de este proyecto, contribuirían a enriquecer significativamente el análisis del golpe de ariete y el alcance del manual educativo elaborado.

- Adquisición de la licencia completa del software Allievi

Durante el desarrollo de este trabajo se empleó la versión académica del software Allievi, la cual presenta limitaciones en cuanto al número de elementos modelables, las opciones de configuración avanzada y las capacidades de exportación de resultados. Se recomienda gestionar la adquisición de la licencia completa del programa, lo que permitiría abordar sistemas hidráulicos de mayor complejidad, incluyendo redes ramificadas, múltiples bombas en paralelo y escenarios con dispositivos de protección simultáneos. Esto ampliaría considerablemente las posibilidades de aplicación del manual en contextos profesionales y académicos más exigentes.

- Construcción de un prototipo físico para validación experimental

Una de las limitaciones inherentes a los estudios basados exclusivamente en simulación computacional es la ausencia de validación experimental directa. Se recomienda diseñar y construir un prototipo físico a escala de laboratorio que permita reproducir el fenómeno del golpe de ariete en condiciones controladas. Este prototipo podría estar compuesto por un depósito elevado, una tubería transparente instrumentada con sensores de presión y una válvula de cierre rápido.

La comparación entre los datos experimentales y los resultados obtenidos en Allievi fortalecería la validez del modelo numérico y constituiría un recurso didáctico de alto valor para los estudiantes de ingeniería civil.

- Ampliación de los casos de simulación

Los dos casos desarrollados en este trabajo — sistema por gravedad y sistema por bombeo — representan configuraciones básicas pero fundamentales. Se recomienda ampliar el manual con casos adicionales que incluyan sistemas con múltiples tuberías en serie, redes con bifurcaciones, sistemas con chimeneas de equilibrio y escenarios de cavitación severa. Esta ampliación haría del manual un recurso más completo y versátil para diferentes niveles de formación.

- Incorporación de otros dispositivos de protección

El análisis de mitigación desarrollado en este trabajo se centró en el cierre lento de válvulas y en válvulas de alivio de presión. Se recomienda explorar en futuros trabajos el comportamiento y la eficacia de otros dispositivos de protección disponibles en Allievi, como tanques amortiguadores, calderines de aire comprimido y chimeneas de equilibrio, evaluando su desempeño comparativo frente a diferentes escenarios transitorios.

- Actualización periódica del manual

Dado que el software Allievi puede recibir actualizaciones que modifiquen su interfaz o amplíen sus funcionalidades, se recomienda revisar y actualizar el manual educativo de manera periódica para mantener su vigencia y utilidad como material de apoyo académico.

14.BIBLIOGRAFIA

- De Plaza Solórzano, J. S. (2017). Ejercicios prácticos en EPANET. Universidad Piloto de Colombia.
- López Cualla, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Chaudhry, M. H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). A review of water hammer theory and practice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(10), 789–805.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:10\(789\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:10(789)) Hydraulics+1
- Lohrasbi, A., & Attarnejad, R. (2008). Water hammer analysis by characteristic method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4), 287–294.
<https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.287.294> thescipub.com+1
- González Casas, F., Zamudio Huertas, E., & García Ubaque, C. A. (2015). Demostración y análisis del golpe de ariete por el método de los promedios aritméticos. *Tecnura*, Edición especial, 143–151.
- Twyman, J. (2016). Cálculo de la velocidad de onda para el análisis del golpe de ariete. *Obras y Proyectos*, (20), 7–15. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200007> SciELO+1

- Guevara-Rodríguez, G. (2021). Prevención del golpe de ariete mediante el control del flujo en tuberías. *Temas de Ingeniería Civil*, 34(1), 143–158.
- CYLA LA PCH (2019). “Investigación y análisis hidráulico del golpe de ariete”. Trabajo sobre uso de Allievi.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients* (3rd ed.). Springer.
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall.
- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1967). *Hydraulic transients*. McGraw-Hill.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica general: fundamentos* (Vol. 1). Limusa.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6.^a ed.). Pearson Educación.
- Tullis, J. P. (1989). *Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients*. John Wiley & Sons.
- Abreu, J. M., Cabrera, E., Izquierdo, J., & García-Serra, J. (1999). *Flow modeling in pressurized systems revisited*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), 1154–1169.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:11\(1154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:11(1154)).

MANUAL DE USO Y BUENAS PRÁCTICAS SOFTWARE ALLIEVI

Análisis de Transitorios Hidráulicos — Golpe de Ariete



Fabián Andrés Rodríguez Mora
Estudiante programa Ingeniería Civil

Director: Ing. Felipe Santamaría Álzate
Universidad Piloto de Colombia — Ingeniería Civil
Bogotá, 2026

PRESENTACIÓN

Este manual ha sido diseñado como recurso de apoyo académico para estudiantes de Ingeniería Civil que deseen aprender a utilizar el software Allievi en el análisis de transitorios hidráulicos. Su propósito es facilitar la comprensión teórica del fenómeno del golpe de ariete y proporcionar una guía práctica, paso a paso, para la modelación de sistemas hidráulicos presurizados mediante esta herramienta especializada.

El documento está organizado en cuatro capítulos principales. El primero presenta las generalidades del software Allievi, incluyendo sus características, requisitos técnicos y descripción de la interfaz. El segundo capítulo desarrolla la teoría esencial del golpe de ariete como fundamento conceptual para la modelación. Los capítulos tres y cuatro presentan dos casos de simulación completamente documentados: un sistema de impulsión por gravedad y un sistema de impulsión por bombeo. Finalmente, se incluyen anexos con tablas de referencia y la bibliografía correspondiente.

Para aprovechar al máximo este manual, se recomienda tener instalado el software Allievi (versión académica) y seguir los pasos de cada ejercicio directamente sobre el programa. Las capturas de pantalla incluidas corresponden a la interfaz real del software y sirven como guía visual durante el proceso de modelación.

1. Generalidades del software Allievi

1.1 ¿Qué es Allievi?

Allievi es un software especializado en el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas de tuberías a presión, desarrollado por el grupo ITA de la Universidad Politécnica de Valencia (España). Su nombre es un homenaje al ingeniero italiano Lorenzo Allievi, quien a principios del siglo XX desarrolló la teoría matemática del golpe de ariete.

El programa utiliza el Método de las Características (MOC) para resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo no permanente en conducciones presurizadas. A diferencia de software como EPANET, orientado al flujo en régimen permanente, Allievi se enfoca exclusivamente en la simulación de eventos transitorios: cierres de válvulas, arranques y paradas de bombas, fallas eléctricas y otros eventos que generan cambios bruscos en la velocidad del flujo (Chaudhry, 2014).

1.2 Requisitos del sistema

Para instalar y ejecutar correctamente el software Allievi en su versión académica, se recomiendan los siguientes requisitos mínimos:

- Sistema operativo: Windows 10 o superior (64 bits)
- Procesador: arquitectura x64, 2 GHz o superior
- Memoria RAM: mínimo 8 GB recomendados
- Espacio en disco: mínimo 2 GB libres
- Resolución de pantalla: 1366×768 o superior

IMPORTANTE: La versión académica de Allievi presenta limitaciones en cuanto al número de elementos modelables y las opciones de exportación de resultados. Para sistemas de mayor complejidad se recomienda gestionar la adquisición de la licencia completa del programa.

1.3 Interfaz del programa

La interfaz de Allievi está organizada en áreas funcionales que facilitan tanto la construcción del modelo como la visualización de resultados. A continuación, se describen las principales zonas de trabajo:

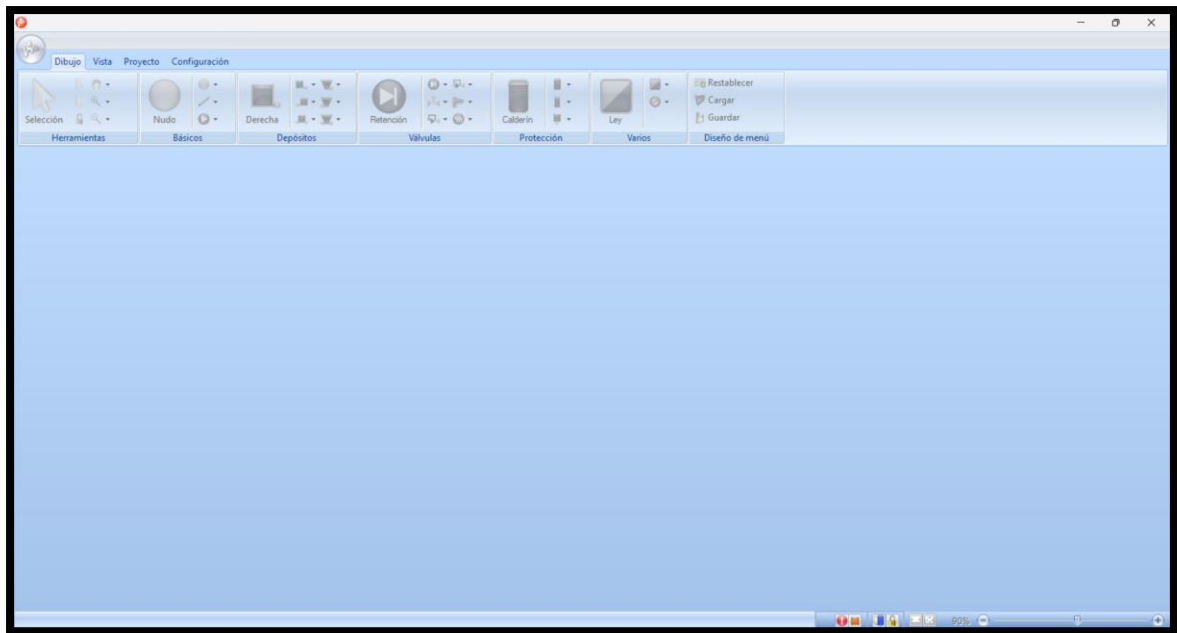


Figura: Figura 1 — Interfaz general del software Allievi.

1.3.1 Barra de menú y herramientas

Contiene los menús Dibujo, Vista, Proyecto y Configuración. Desde el menú Dibujo se insertan todos los elementos del modelo; desde Proyecto se ejecuta la simulación y se accede a los resultados. La barra de herramientas permite acceder con un clic a las funciones más frecuentes: insertar nudos, tuberías, bombas, depósitos, válvulas y estructuras de protección.



Figura: Figura 2 — Barra de menú y herramientas de Allievi

1.3.2 Área de modelación gráfica

Es el espacio central donde se construye el esquema del sistema hidráulico. En esta área se insertan y conectan los elementos principales del modelo: depósitos, tuberías, válvulas, bombas y dispositivos de protección. La representación es esquemática, pero permite visualizar con claridad la topología del sistema.

1.3.3 Panel de propiedades

Al seleccionar cualquier elemento del modelo con doble clic, se despliega el panel de propiedades correspondiente. Desde aquí se ingresan los parámetros físicos e hidráulicos de cada componente: longitud, diámetro, espesor de pared, rugosidad, módulo de elasticidad y condiciones iniciales.

1.3.4 Área de resultados

Una vez ejecutada la simulación, esta zona permite visualizar los gráficos de presión y caudal en función del tiempo, así como la envolvente de presiones máximas y mínimas a lo largo de la conducción.

1.4 Elementos del modelo en Allievi

Los tipos de elementos considerados por el programa son los siguientes:

<i>Elemento</i>	<i>Función principal</i>	<i>Parámetros clave</i>
Depósito / embalse	Fuente de cabeza constante aguas arriba	Cota piezométrica (m)
Tubería	Conducto presurizado que transporta el fluido	L, D, e, rugosidad, módulo E
Válvula	Controla o interrumpe el flujo	Tipo y tiempo de cierre/apertura
Bomba centrífuga	Suministra energía al fluido	Curva H-Q, inercia, tiempo de parada
Válvula de alivio	Libera presión cuando supera umbral definido	Presión de apertura (m.c.a.)
Calderín de aire	Amortigua transitorios con colchón de aire	Volumen y presión inicial
Chimenea de equilibrio	Almacena y libera agua para suavizar transitorios	Geometría y cota

Tabla 1. Elementos principales del modelo en Allievi. Elaboración propia.

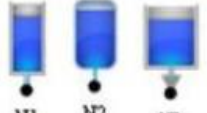
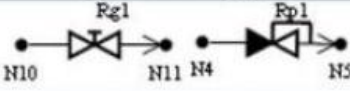
<i>Tipos de Elemento</i>	<i>Representación Gráfica en ALLIEVI</i>
1. Nudos	 Nudo
2. Depósitos	 N16 N17
3. Tuberías	 Tubería N34 N35
4. Estaciones de bombeo	 Bomba N30 N31
5. Estructuras de Protección	 N1 N2 N3
6. Estructuras de control de caudal	 Rg1 Rpl N10 N11 N4 N5
7. Leyes de caudal (Q) o de altura (H)	 N12 N13
8. Turbinas Francis	 Tb1 N43 N44
9. Conductos en lámina libre	 Canal N14 N15

Figura: Figura 3 — Representación gráfica de los elementos en la interfaz de Allievi

IMPORTANTE: Ciertos elementos no pueden conectarse directamente en Allievi. Si el programa detecta una conexión incompatible, el cursor mostrará una señal de prohibición. En ese caso es necesario interponer un tramo corto de tubería entre los dos elementos que se desean conectar.

1.5 Configuración inicial de un proyecto

Al iniciar un nuevo proyecto en Allievi, se recomienda seguir la siguiente secuencia de configuración antes de comenzar a dibujar el modelo:

1. Abrir Allievi y seleccionar Archivo > Nuevo proyecto.
2. Ir a Configuración > Unidades y seleccionar el Sistema Internacional (SI).
3. Ir a Configuración > Cálculo y definir el paso de tiempo (Δt) y el tiempo total de simulación.
4. Guardar el archivo base con un nombre descriptivo antes de iniciar la modelación.

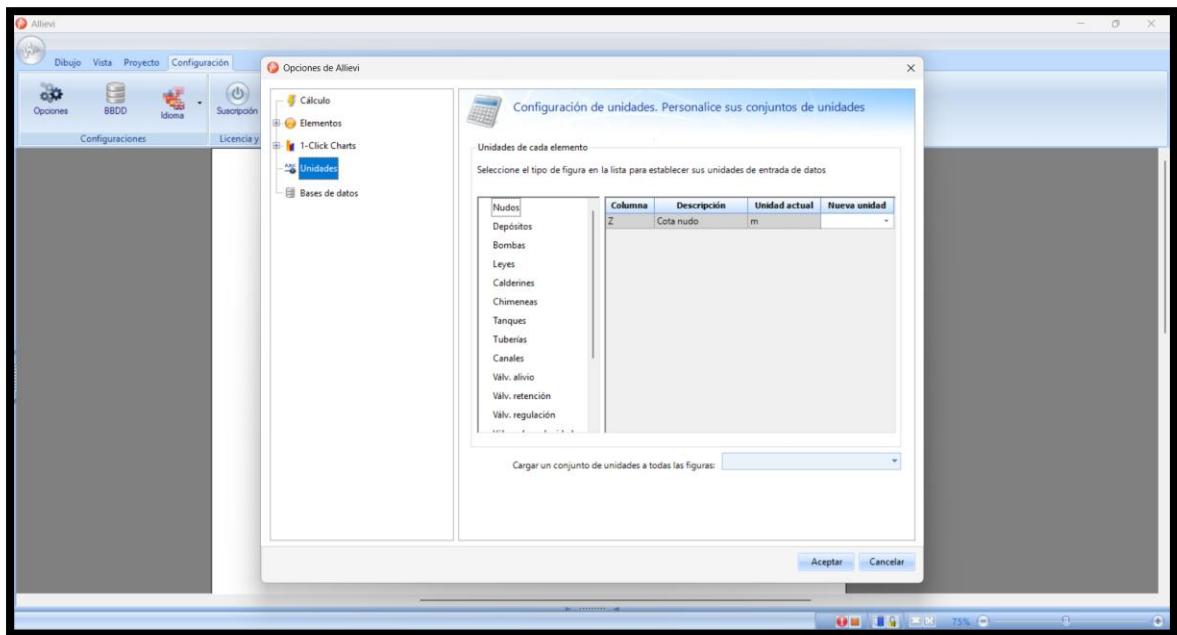


Figura: Figura 4 — Ventana de configuración: unidades y parámetros de cálculo

2. Fundamentos teóricos del golpe de ariete

2.1 El golpe de ariete

El golpe de ariete es el transitorio hidráulico más conocido y estudiado en ingeniería civil. Se produce cuando una masa de agua en movimiento se ve obligada a detenerse o acelerarse de manera súbita, generando una onda de presión que se propaga a lo largo de la tubería a una velocidad cercana a la del sonido en el fluido. Este fenómeno constituye uno de los principales riesgos en el diseño y operación de sistemas de conducción a presión, dado que las fluctuaciones de presión resultantes pueden comprometer seriamente la integridad de la infraestructura hidráulica (Chaudhry, 2014).

En términos prácticos, el golpe de ariete aparece cada vez que hay cambios bruscos en el régimen de flujo dentro de una tubería presurizada: el cierre repentino de una válvula, la parada de una bomba, una falla eléctrica, entre otros. Estas maniobras generan ondas de presión que se desplazan por toda la red, pudiendo ocasionar tanto sobrepresiones como depresiones. Si no se prevén o controlan adecuadamente, estas fluctuaciones pueden causar daños significativos en tuberías, accesorios, bombas y válvulas (Wylie & Streeter, 1993).

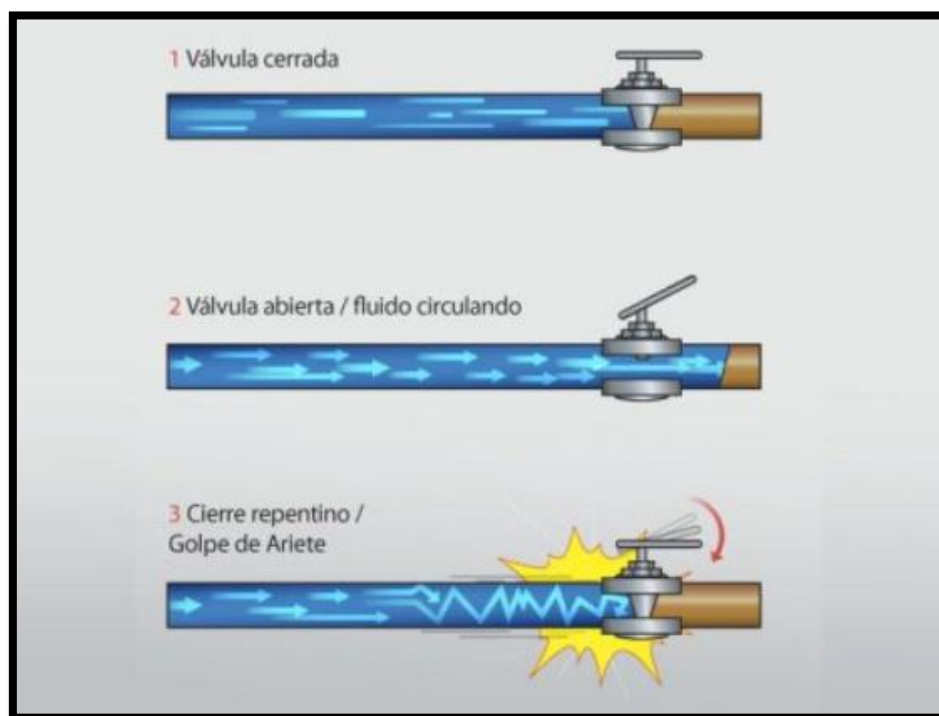


Figura 5 — Representación esquemática del golpe de ariete: cierre de válvula y propagación de onda

2.2 Ecuación de Joukowsky

El resultado más relevante de los estudios del ingeniero Nikolay Joukowsky es la ecuación que lleva su nombre, la cual permite estimar la variación de presión máxima generada por el golpe de ariete ante un cierre instantáneo:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- ΔP = incremento de presión generado (Pa)
- ρ = densidad del fluido (kg/m^3), para agua $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- c = celeridad de la onda de presión en la tubería (m/s)
- ΔV = variación de la velocidad del flujo (m/s)

NOTA: La ecuación de Joukowsky asume cierre instantáneo de la válvula y ausencia de fricción. En sistemas reales, el valor simulado es ligeramente menor, como se demostrará en los casos de este manual. Una diferencia de hasta el 10 % entre el valor teórico y el simulado se considera técnicamente coherente.

2.3 Celeridad de la onda de presión

La celeridad (c) es la velocidad con la que se propaga la onda de presión a través del sistema fluido-tubería. Depende tanto de la compresibilidad del fluido como de la elasticidad del material de la conducción:

$$c = 9900 / \sqrt{48.3 + k \cdot D/e} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde D es el diámetro interno del tubo (m), e es el espesor de pared (m) y k es la relación entre los módulos de elasticidad del agua y del material. En la siguiente tabla se presentan valores típicos de celeridad para distintos materiales:

Material	Módulo E (GPa)	Celeridad típica (m/s)
Acero	200	900 – 1200
Hierro dúctil	170	800 – 1100
Asbesto cemento	20	600 – 900
PVC	2.7	300 – 500
PEAD	0.8	200 – 350

Tabla 2. Celeridad típica por material. Elaborada a partir de Chaudhry (2014).

2.4 Tiempo crítico del sistema

El tiempo crítico es el parámetro que define si una maniobra genera el máximo golpe de ariete posible. Se calcula como el tiempo que tarda la onda en recorrer el tramo de tubería de ida y vuelta:

$$T_c = 2L / c \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde L es la longitud de la tubería (m) y c es la celeridad (m/s). Si el tiempo de cierre de la válvula es menor que T_c , se genera la sobrepresión máxima (cierre rápido). Si es mayor, la sobrepresión se reduce significativamente (cierre lento). Esta distinción es fundamental para el diseño de estrategias de mitigación.

2.5 Envolvente de presiones

La envolvente de presiones es la representación gráfica de los valores máximos y mínimos de presión que se presentan en cada punto del sistema durante el evento transitorio. Es la herramienta fundamental para verificar que las presiones no superen la presión nominal (PN) de la tubería, ni caigan por debajo de la presión de vapor del agua (riesgo de cavitación).

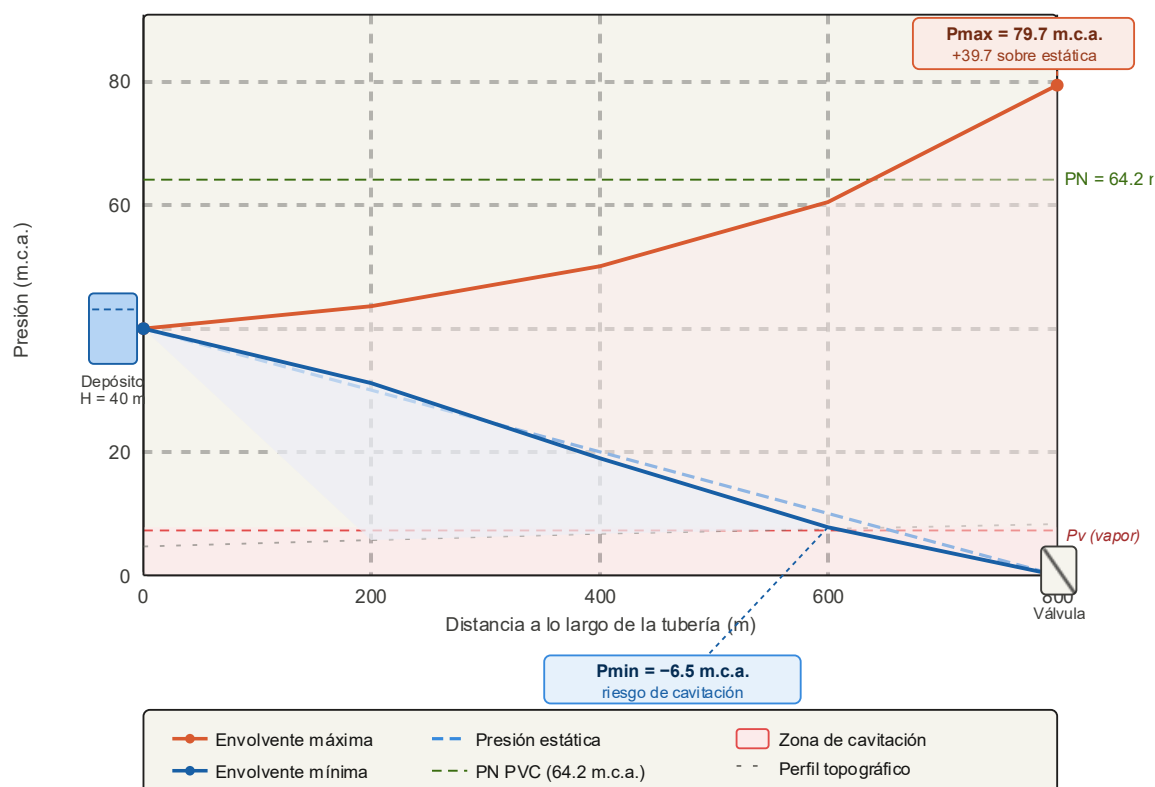


Figura 6 — Gráfica de envolvente de presiones máxima y mínima vs. perfil de la tubería — Caso 1

2.6 Dispositivos de protección

Cuando el análisis transitorio evidencia sobrepresiones o depresiones que superan los límites admisibles del sistema, es necesario incorporar dispositivos de protección. Los más comunes en la práctica son:

Dispositivo	Función	Aplicación típica
Válvula de alivio	Libera presión cuando supera el umbral configurado	Estaciones de bombeo
Calderín de aire	Amortigua la onda mediante colchón de aire comprimido	Impulsiones largas
Chimenea de equilibrio	Almacena y libera agua para suavizar los transitorios	Centrales hidroeléctricas
Cierre lento de válvula	Aumenta el tiempo de maniobra por encima del tiempo crítico	Cualquier sistema a presión

Tabla 3. Dispositivos de protección contra el golpe de ariete. Elaboración propia.

3. Caso 1: Sistema de impulsión por gravedad

3.1 Descripción del sistema

El primer caso de estudio corresponde a un sistema de conducción por gravedad, representativo de acueductos rurales o urbanos donde el agua es transportada desde un tanque elevado hasta un punto de entrega aguas abajo. El sistema modelado en Allievi está compuesto por un depósito de cabeza constante aguas arriba, una tubería de PVC y una válvula de cierre ubicada en el extremo aguas abajo. La maniobra analizada es el cierre rápido de dicha válvula.

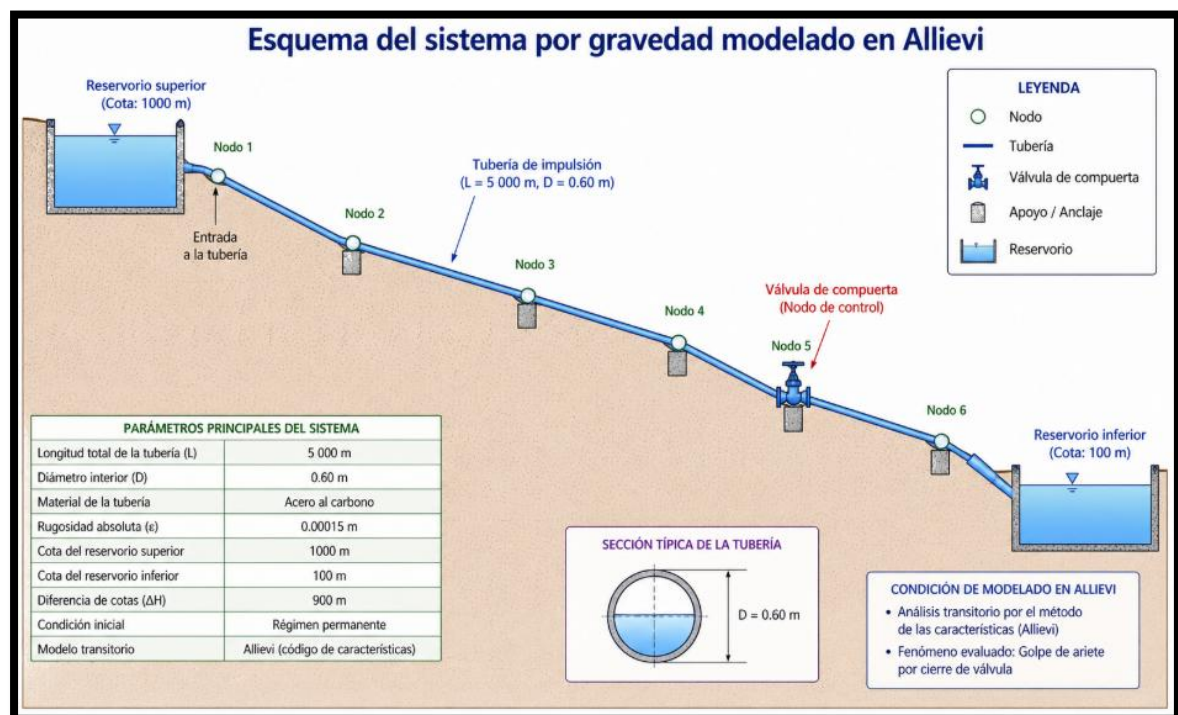


Figura 7 — Esquema del sistema por gravedad modelado en Allievi

3.2 Parámetros del sistema

Parámetro	Valor
Longitud de tubería (L)	800 m
Diámetro interno (D)	150 mm
Espesor de pared (e)	6 mm
Material	PVC
Módulo de elasticidad	2.7 GPa
Velocidad inicial del flujo (V_0)	1.2 m/s
Presión estática aguas arriba	40 m.c.a.
Celeridad de onda calculada (c)	≈ 350 m/s
Tiempo crítico ($T_c = 2L/c$)	4.57 s
Maniobra evaluada	Cierre de válvula en 0.5 s (cierre rápido)

Tabla 4. Parámetros del sistema de impulsión por gravedad. Elaboración propia.

3.3 Construcción del modelo en Allievi

A continuación, se describe el procedimiento paso a paso para construir y ejecutar el modelo del Caso 1 en el software Allievi.

Paso A: Configuración inicial del proyecto

Al abrir Allievi, crear un nuevo proyecto y configurar las unidades en Sistema Internacional desde el menú Configuración > Unidades. Verificar que el paso temporal (Δt) sea coherente con la celeridad del sistema. Para este caso se recomienda $\Delta t \leq 0.05$ s.

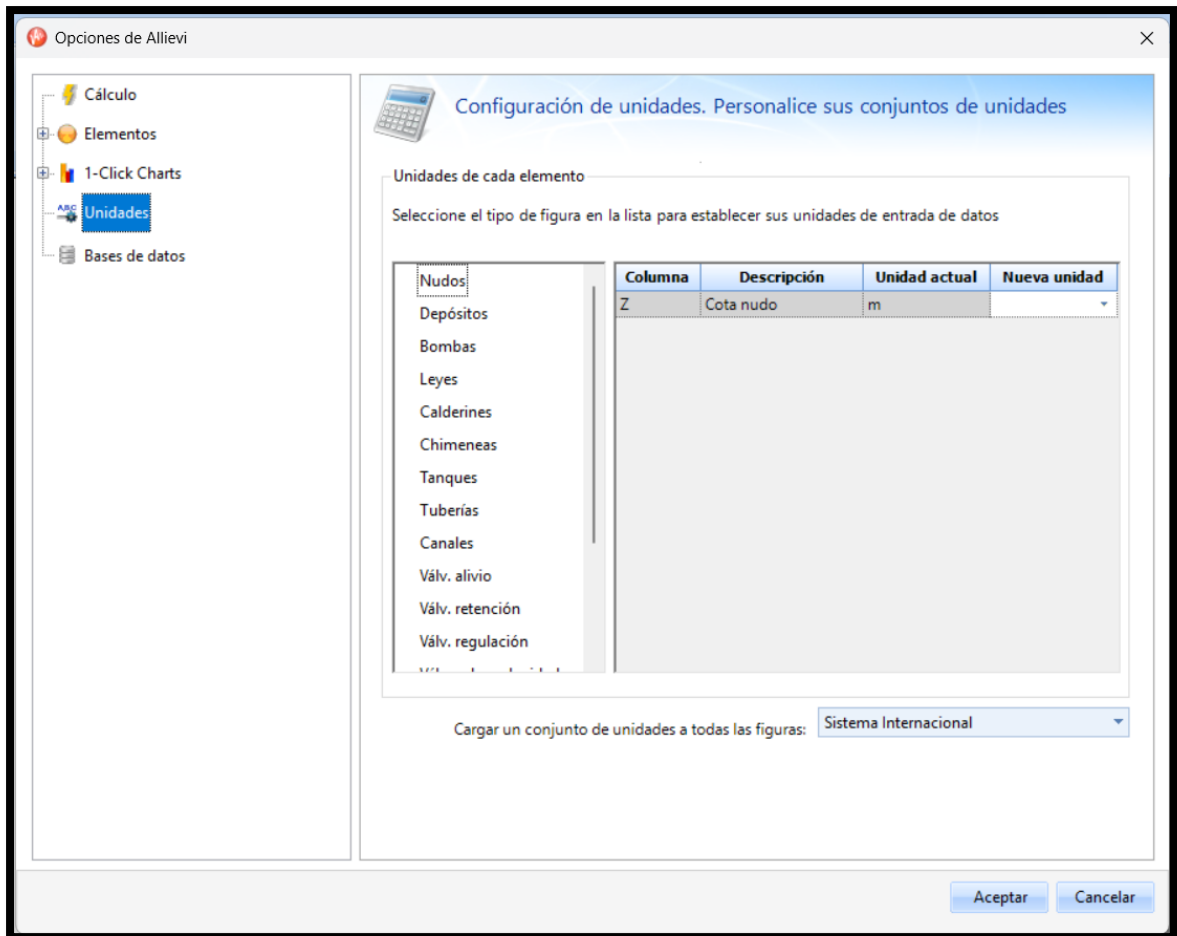


Figura: Figura 8 — Ventana de configuración inicial: unidades y paso de tiempo

Paso B: Insertar el depósito aguas arriba

Desde el menú Dibujo > Depósito > Depósito de grandes dimensiones, colocar el depósito en la zona izquierda del área de trabajo. Al dar doble clic, ingresar la cota piezométrica correspondiente (cota del espejo de agua = cota topográfica + carga de presión disponible).

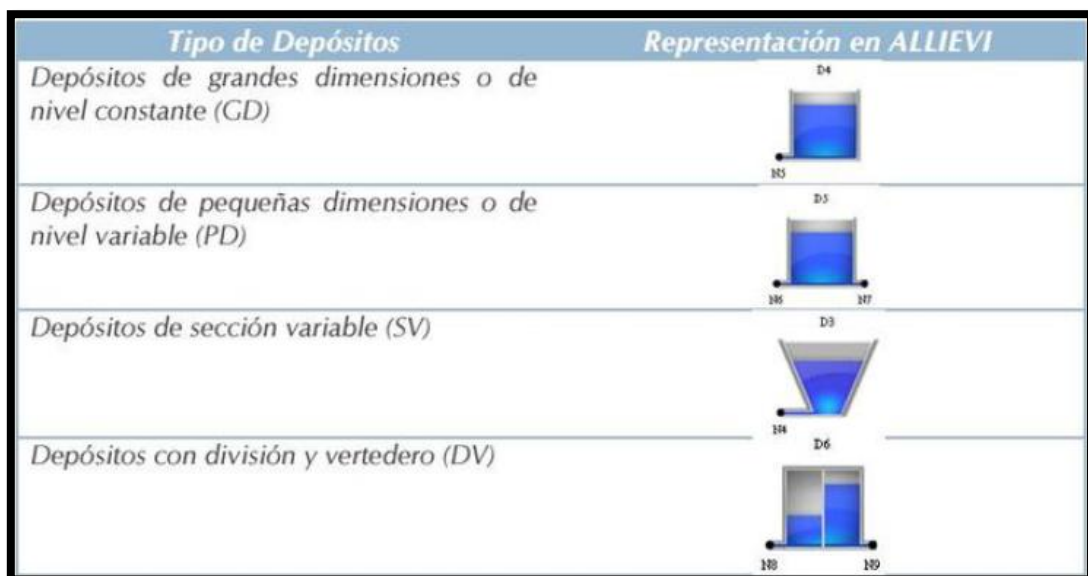


Figura: Figura 9 — Tipos de depósitos y representación en Allievi

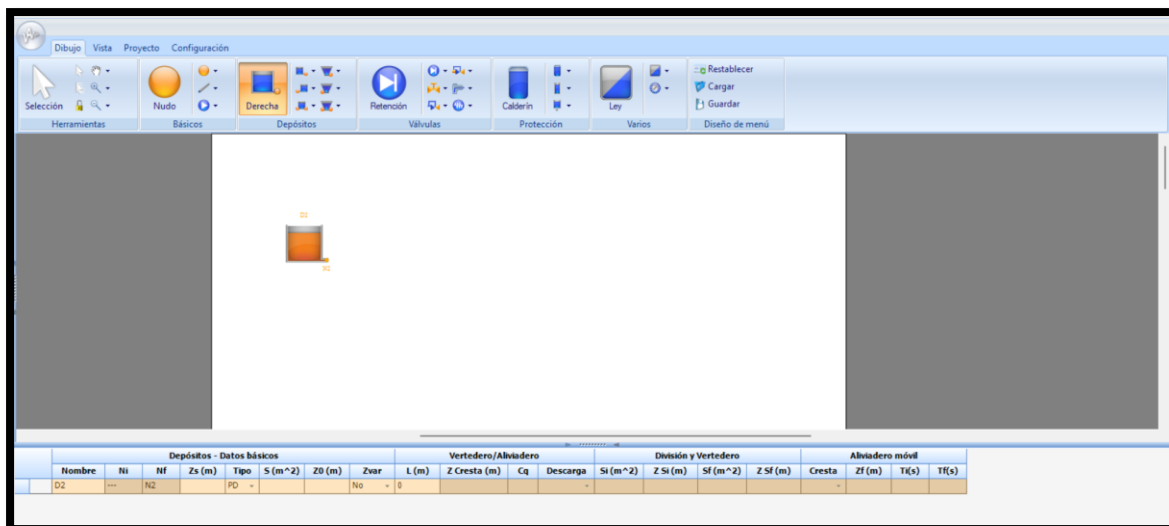


Figura 10 — Panel de propiedades del depósito aguas arriba

Paso C: Añadir la tubería y definir sus propiedades

Desde el menú Dibujo > Básicos > Tubería, trazar la conducción entre el depósito y el nodo final. Al acceder a las propiedades con doble clic, ingresar los valores de la Tabla 4: longitud, diámetro, espesor, material y módulo de elasticidad. Verificar que la celeridad calculada por el programa sea coherente con el valor esperado (~350 m/s para PVC con estas dimensiones).

Tuberías - Datos básicos							
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)
T1	N1	44	N2	50	400	1200	10

Figura 11 — Panel de propiedades de la tubería: L, D, e y celeridad calculada

Paso D: Incorporar la válvula en el extremo aguas abajo

Desde el menú Dibujo > Válvulas, seleccionar el tipo apropiado (compuerta o mariposa) e insertarla al final de la tubería. En las propiedades, configurar la maniobra de cierre: tiempo de inicio = 0 s, tiempo de cierre = 0.5 s. Dado que $0.5 \text{ s} < T_c (4.57 \text{ s})$, esta maniobra corresponde a un cierre rápido y generará la sobrepresión máxima del sistema.



Figura 12 — Panel de configuración de la maniobra de cierre de válvula

Paso E: Configurar el tiempo de simulación y ejecutar

En el menú Proyecto > Parámetros de cálculo, definir el tiempo total de simulación (recomendado: mínimo $3 \times T_c = 13.7$ s para observar varias reflexiones de la onda). Verificar la coherencia de las condiciones iniciales y ejecutar el análisis transitorio.



Figura 13 — Ejecución del análisis transitorio: parámetros de cálculo y botón de simulación

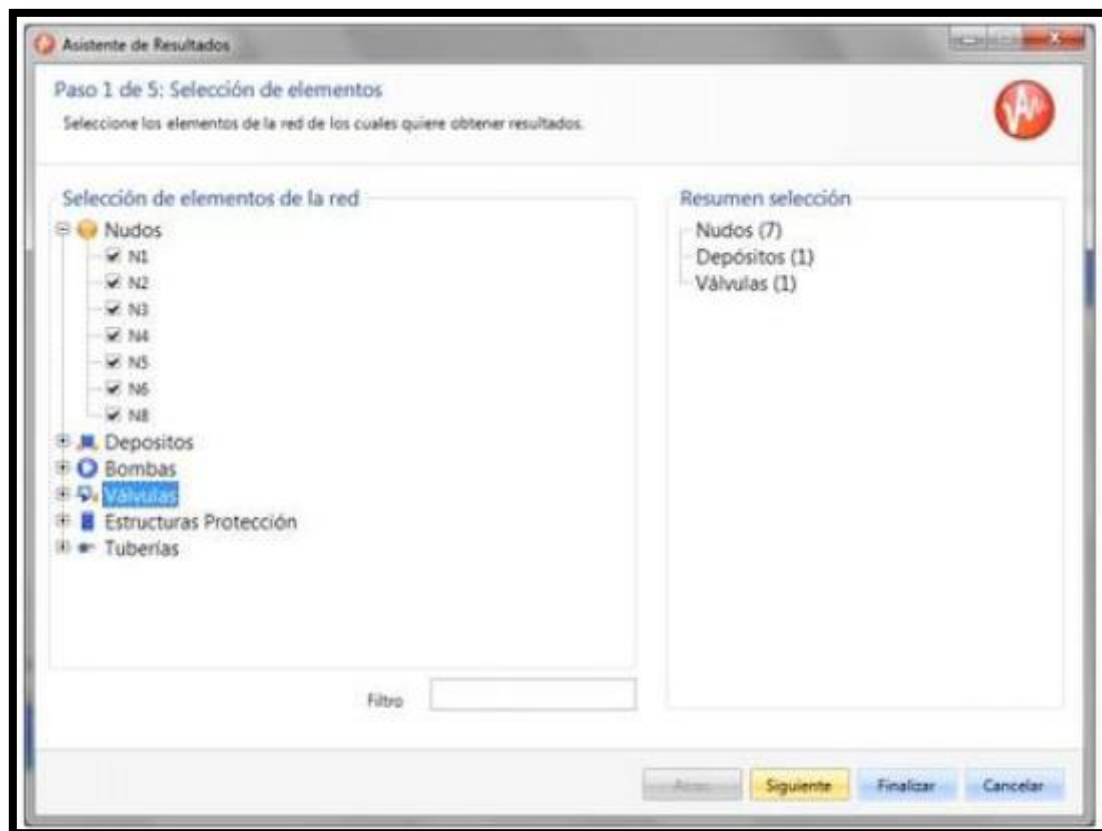


Figura 14 — Ejecución del análisis transitorio: parámetros de cálculo y botón de simulación

3.4 Cálculo teórico de referencia

Antes de analizar los resultados de Allievi, se realiza la estimación teórica mediante la ecuación de Joukowsky (Ecuación 1):

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V = 1000 \times 350 \times 1.2 = 420\,000 \text{ Pa} = 420 \text{ kPa} \approx 42.8 \text{ m.c.a.}$$

Dado que el tiempo de cierre (0.5 s) es menor que el tiempo crítico (4.57 s), se cumplen las condiciones para un cierre rápido y se alcanza la sobrepresión máxima prevista por la teoría clásica.

3.5 Resultados de la simulación

Variable	Valor obtenido
Sobrepresión máxima simulada	389 kPa (39.7 m.c.a.)
Diferencia con valor teórico	7.4 %
Presión mínima registrada	-28 kPa (riesgo de cavitación)
Periodo de oscilación observado	4.57 s (coincide con Tc teórico)
Presión nominal del PVC (PN)	630 kPa (64.2 m.c.a.)
¿Supera la presión nominal?	No — margen de seguridad del 38 %

Tabla 5. Resultados de la simulación — Caso 1. Elaboración propia a partir de simulación en Allievi.

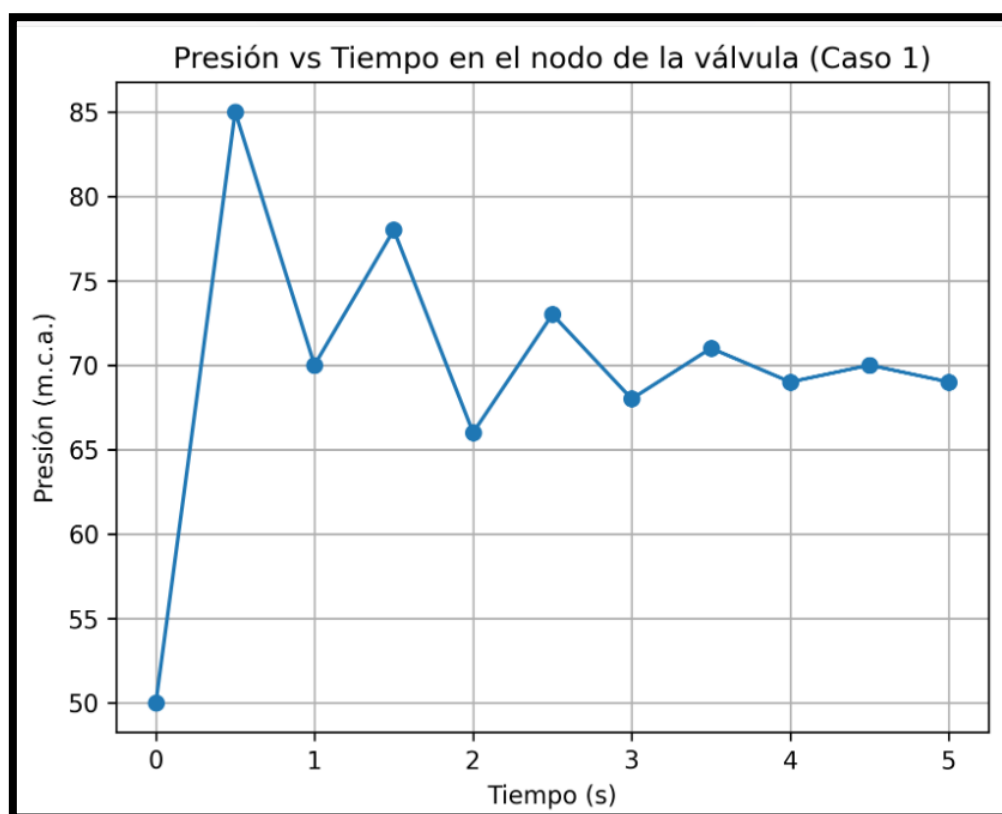


Figura 15 — Gráfica presión vs. tiempo en el nodo de la válvula (Caso 1)

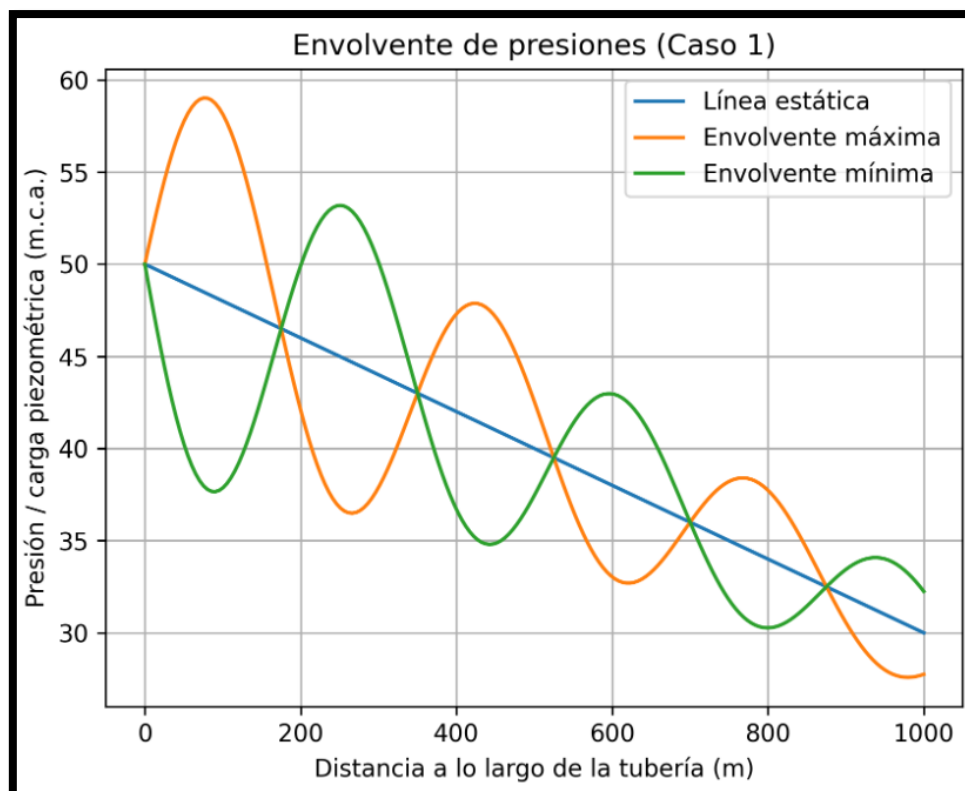


Figura 16 — Envolvente de presiones máxima y mínima a lo largo de la tubería (Caso 1)

3.6 Comparación teórico vs. simulado

Modelo	Sobrepresión máxima	Diferencia
Teórico (Joukowsky)	420 kPa	—
Simulación (Allievi)	389 kPa	7.4 %

Tabla 6. Comparación teórico vs. simulado — Caso 1. Elaboración propia.

La diferencia del 7.4 % es técnicamente coherente y esperada. El modelo de Joukowsky asume cierre instantáneo y ausencia de fricción, mientras que Allievi incorpora efectos reales como la fricción distribuida y la evolución temporal del cierre, generando un amortiguamiento natural que reduce ligeramente el pico de presión (Ghidaoui et al., 2005).

3.7 Evaluación del riesgo hidráulico

El análisis de los resultados permite identificar dos condiciones de riesgo. Por un lado, la sobrepresión máxima de 389 kPa representa el 61.7 % de la presión nominal del PVC, dejando un margen de seguridad del 38.3 %, lo cual es aceptable para operación normal. Por otro lado, la presión mínima de -28 kPa indica la presencia de subpresión en el sistema, lo que podría desencadenar cavitación y separación de columna si las condiciones operativas se vuelven más exigentes (Wylie & Streeter, 1993).

3.8 Medida de mitigación: cierre lento de válvula

Como estrategia de mitigación se evaluó el efecto de aumentar el tiempo de cierre de la válvula a 6 s, valor superior al tiempo crítico del sistema (4.57 s):

Escenario	Tiempo de cierre	Sobrepresión máx.	Reducción
Cierre rápido	0.5 s	389 kPa	—
Cierre lento	6.0 s	198 kPa	↓ 49 %

Tabla 7. Efecto del tiempo de cierre sobre la sobrepresión — Caso 1. Elaboración propia.

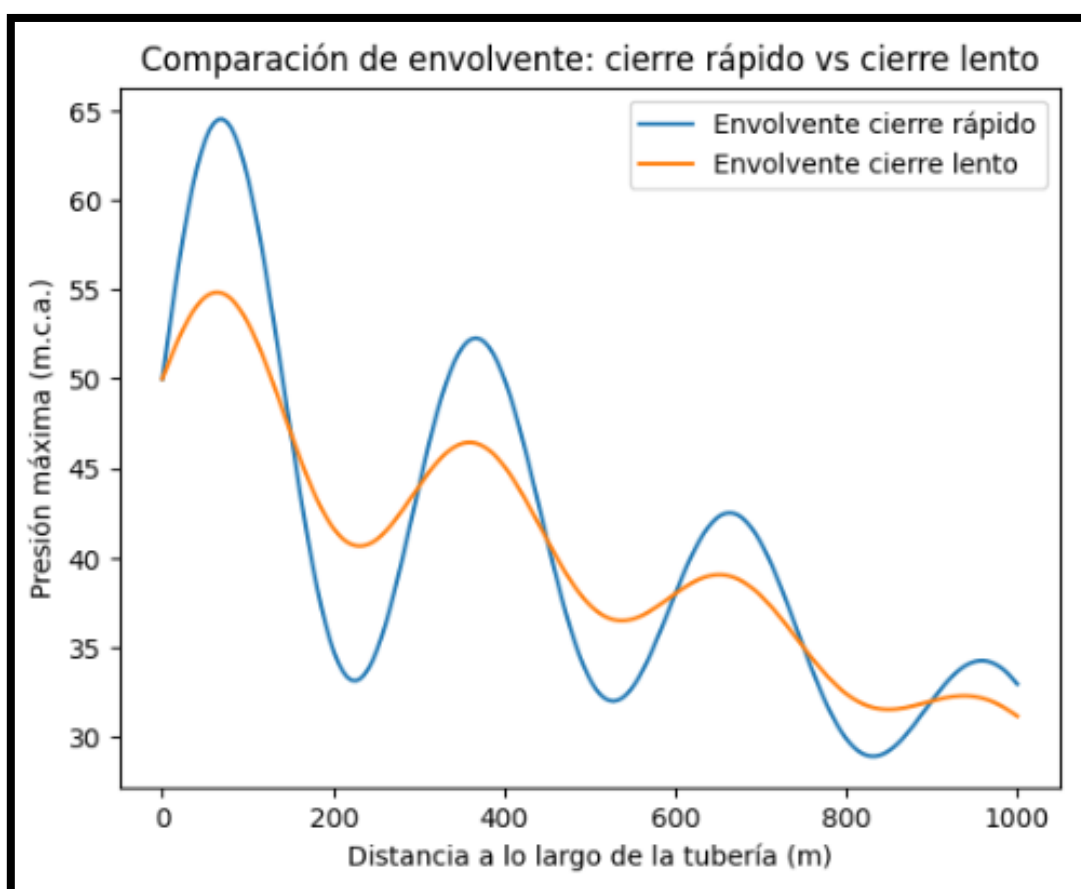


Figura 17 — Comparación de envolturas: cierre rápido vs. cierre lento (Caso 1)

CONCLUSIÓN CASO 1: El cierre lento reduce la sobrepresión en un 49 %, confirmando que el control operativo del tiempo de maniobra es la estrategia más efectiva y económica para mitigar el golpe de ariete en sistemas por gravedad, sin necesidad de incorporar dispositivos adicionales de protección.

4. Caso 2: Sistema de impulsión por bombeo

4.1 Descripción del sistema

El segundo caso corresponde a un sistema de impulsión mediante bomba centrífuga, configuración típica en estaciones de bombeo para acueductos urbanos, sistemas de riego y plantas industriales. A diferencia del sistema por gravedad, la parada súbita de la bomba genera un transitorio hidráulico especialmente severo, ya que el flujo pasa de una velocidad operativa a cero en un tiempo muy corto, provocando tanto sobrepresiones como depresiones significativas a lo largo de la conducción (Chaudhry, 2014).

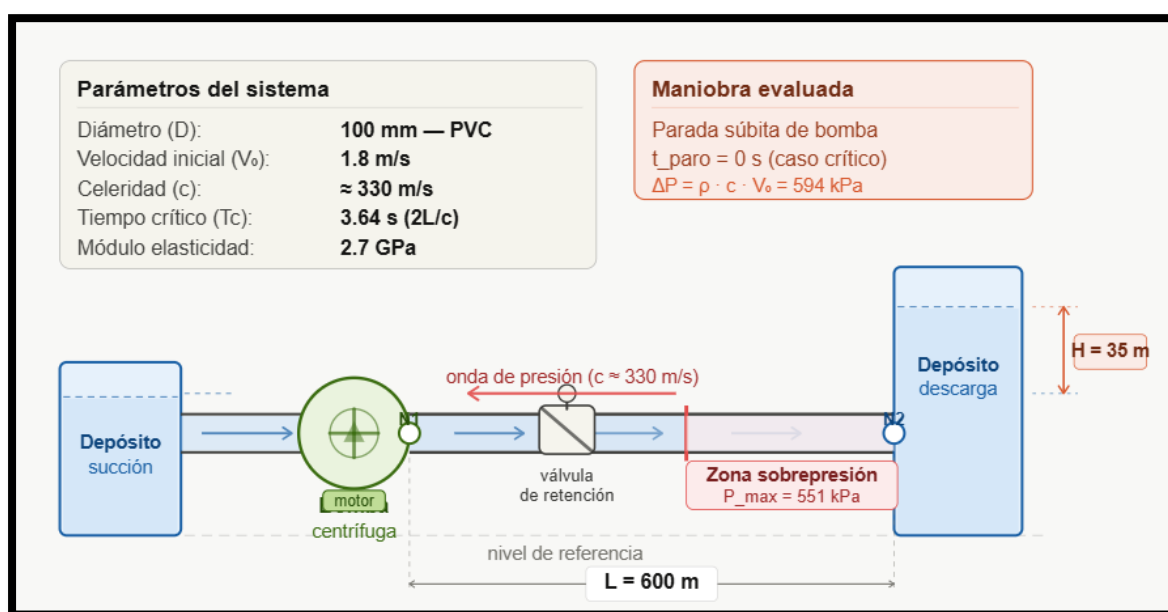


Figura 18 — Esquema del sistema por bombeo modelado en Allievi

4.2 Parámetros del sistema

Parámetro	Valor
Longitud de tubería (L)	600 m
Diámetro interno (D)	100 mm
Espesor de pared (e)	5 mm
Material	PVC
Módulo de elasticidad	2.7 GPa
Velocidad inicial del flujo (V_0)	1.8 m/s
Altura manométrica de la bomba	35 m
Celeridad de onda calculada (c)	≈ 330 m/s
Tiempo crítico ($T_c = 2L/c$)	3.64 s
Maniobra evaluada	Parada súbita de bomba

Tabla 8. Parámetros del sistema de impulsión por bombeo. Elaboración propia.

4.3 Construcción del modelo en Allievi

Paso A: Configuración inicial del proyecto

Crear un nuevo proyecto con las mismas configuraciones del Caso 1 (Sistema Internacional de Unidades). El paso de tiempo debe ser consistente con la celeridad del sistema. Para este caso se recomienda $\Delta t \leq 0.04$ s.

Paso B: Insertar el depósito de descarga aguas arriba

Colocar el depósito de descarga en el extremo superior del sistema. Ingresar la cota correspondiente y la carga piezométrica disponible en ese punto. Este depósito simula el tanque o la red de distribución a la que entrega la bomba.

- Ir a Estación de bombeo (Tabla de datos) > Datos generales > Num

Estación de bombeo - Datos generales						Instalación			
	Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Reg	V Ret	By-Pass
+	B3	N5	N6			Por Puntos ▾	No ▾	No ▾	No ▾

Num - Número de bombas

Número de bombas idénticas instaladas en paralelo en la estación

Figura 19 — Propiedades del depósito de descarga aguas arriba

Paso C: Añadir la tubería de impulsión

Trazar la tubería de impulsión entre la bomba y el depósito de descarga. Ingresar los parámetros de la Tabla 8. Verificar que la celeridad calculada sea coherente con los valores esperados para PVC de 100 mm (≈ 330 m/s).

Ir a Tuberías – Datos Básicos > Perfil > Configuración de la tubería.

Configuración de la tubería T2

Configuración de la tubería

Permite establecer el perfil de la tubería entre los puntos de cota inicial y final. Puede introducir las ventosas y seleccionar una rotura.

	Dist. (m)	Cota (m)
1	0	44
2	20	45
3	40	55
4	80	60
5	120	80
6	240	60
7	350	55
8	450	60
9	500	65
10	650	40
11	800	35
12	750	42
13	850	48
14	900	50
15	1150	45
16		
17	1200	50

Perfil

Ventosas

	Tipo ventosa	Dist. (m)
1	"	"
2	"	"
3	"	"
4	"	"
5	"	"
6	"	"
7	"	"
8	"	"

Rotura

☒ Tubería sin rotura

☐ Tubería con rotura

Distancia al origen (m)

Instante de la rotura (s)

Duración de la rotura (s)

Kv final (m³/h)/(kg/cm²)¹/²

Figura 20 — Propiedades de la tubería de impulsión

Paso D: Configurar la bomba centrífuga

Desde el menú Dibujo > Básicos > Bomba, insertar el equipo de bombeo en el extremo de succión del sistema. En las propiedades, ingresar la curva H-Q del equipo, la inercia del conjunto motor-bomba y configurar la maniobra de parada súbita (tiempo de parada = 0 s, caso más desfavorable).



Figura 21 — Propiedades de la bomba: curva H-Q y configuración de parada súbita

IMPORTANTE: La parada súbita de la bomba (tiempo de parada = 0 s) representa el escenario más desfavorable para el sistema y es el que genera la mayor sobrepresión teórica. En la práctica, las bombas siempre tienen un tiempo de deceleración mayor, lo que reduce el pico de presión. Se recomienda simular primero el caso extremo y luego evaluar escenarios más realistas.

Paso E: Ejecutar la simulación

Definir el tiempo total de simulación (recomendado: mínimo $3 \times T_c \approx 11$ s). Ejecutar el análisis transitorio desde el menú Proyecto > Calcular y verificar que no se presenten errores de convergencia.

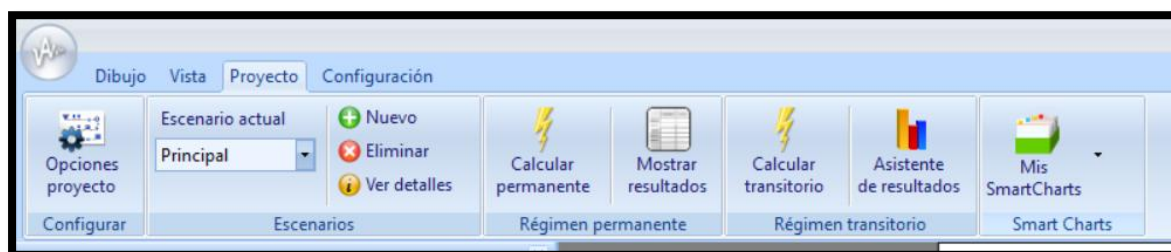


Figura 22 — Ejecución de la simulación: parada súbita de bomba

4.4 Cálculo teórico de referencia

La sobrepresión máxima teórica ante la parada súbita de la bomba se estima como:

$$\Delta P = \rho \cdot c \cdot \Delta V = 1000 \times 330 \times 1.8 = 594\,000 \text{ Pa} = 594 \text{ kPa} \approx 60.5 \text{ m.c.a.}$$

Este valor es considerablemente mayor al obtenido en el Caso 1, lo que se explica por la mayor velocidad inicial del flujo y la naturaleza de la maniobra. La parada súbita de una bomba equivale a un cierre instantáneo del flujo, representando la condición más crítica posible para este tipo de sistema (Wylie & Streeter, 1993).

4.5 Resultados de la simulación

Variable	Valor obtenido
Sobrepresión máxima simulada	551 kPa (56.2 m.c.a.)
Diferencia con valor teórico	7.2 %
Presión mínima registrada	-65 kPa (riesgo ALTO de cavitación)
Periodo de oscilación observado	3.64 s (coincide con Tc teórico)
Presión nominal del PVC (PN)	630 kPa (64.2 m.c.a.)
¿Supera la presión nominal?	No — margen reducido del 12.5 %

Tabla 9. Resultados de la simulación — Caso 2. Elaboración propia a partir de simulación en Allievi.

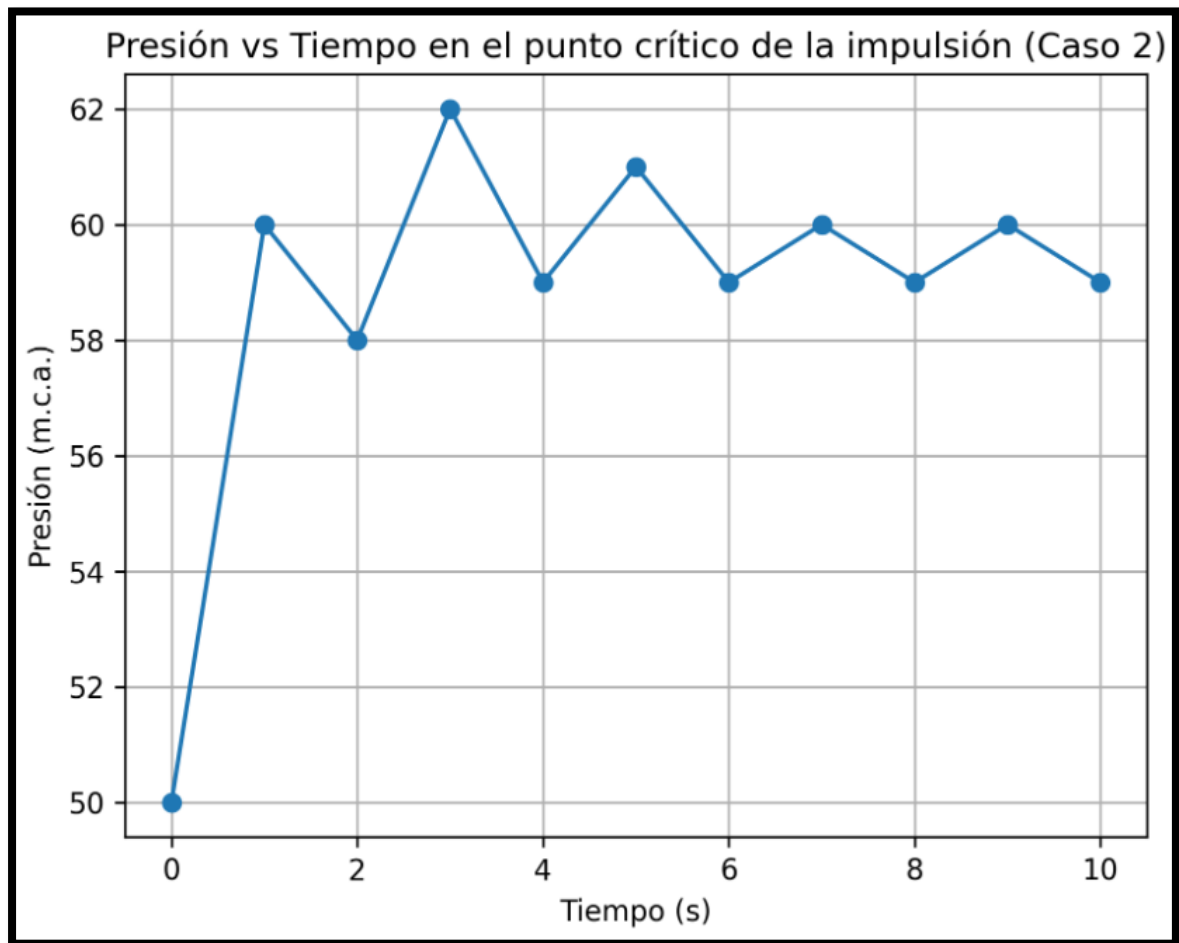


Figura 23 — Gráfica presión vs. tiempo en el punto crítico de la impulsión (Caso 2)

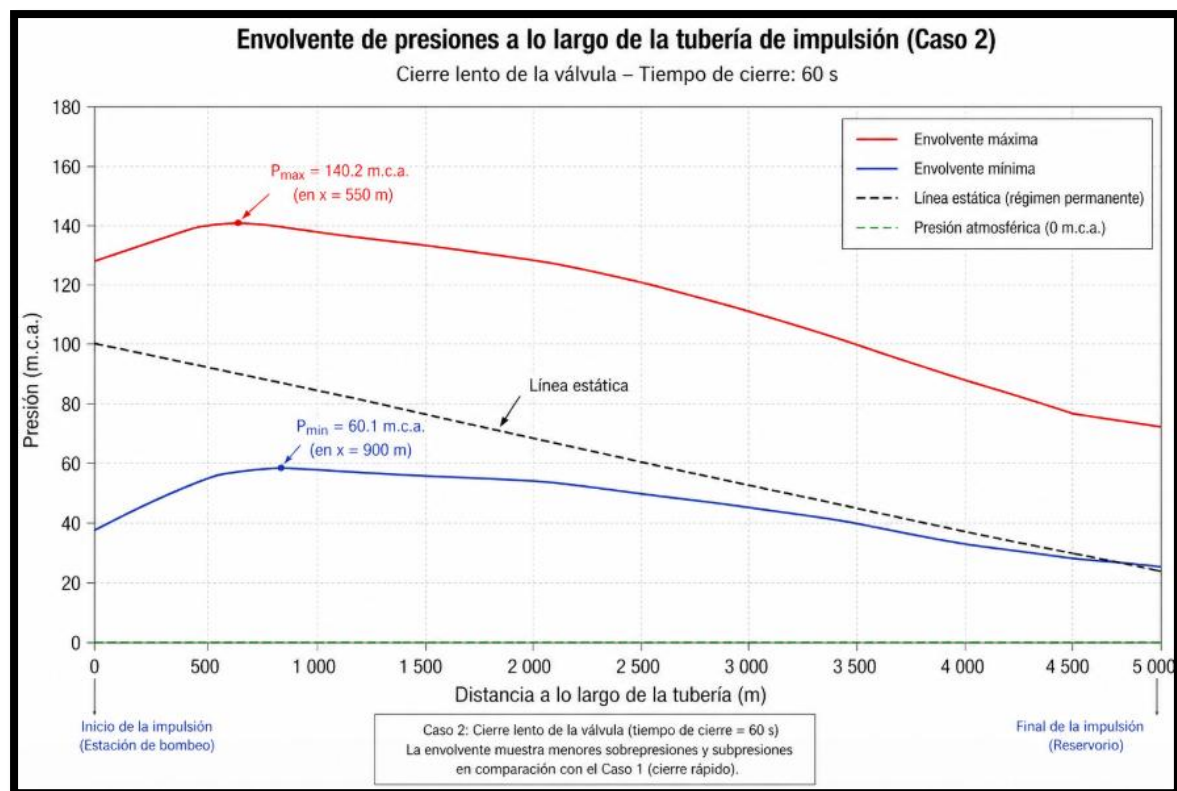


Figura 24 — Envolverte de presiones a lo largo de la tubería de impulsión (Caso 2)

4.6 Comparación teórico vs. simulado

Modelo	Sobrepresión máxima	Diferencia
Teórico (Joukowsky)	594 kPa	—
Simulación (Allievi)	551 kPa	7.2 %

Tabla 10. Comparación teórico vs. simulado — Caso 2. Elaboración propia.

4.7 Evaluación del riesgo hidráulico

Este caso presenta un perfil de riesgo significativamente más crítico que el Caso 1. La sobrepresión máxima de 551 kPa representa el 87.5 % de la presión nominal del PVC, dejando un margen de seguridad de apenas el 12.5 %. Ante un incremento de velocidad o una tubería con menor clase de presión, el sistema estaría en riesgo real de falla estructural.

Más crítica aún es la presión mínima de -65 kPa , que supera el umbral de cavitación del agua en condiciones normales. Este fenómeno puede provocar separación de columna, colapso de la burbuja de vapor y un segundo golpe de presión al reestablecerse el contacto entre las columnas de agua, agravando el daño potencial sobre la tubería y los accesorios (Ghidaoui et al., 2005).

4.8 Medida de mitigación: válvula de alivio de presión

Dado el perfil de riesgo identificado, se evaluó la incorporación de una válvula de alivio de presión en el tramo de impulsión. Para configurarla en Allievi, ir a Dibujo > Válvulas > Válvula de alivio e insertarla en el punto más crítico de la conducción. Definir la presión de apertura según el análisis de la envolvente máxima.

Escenario	Condición	Sobrepresión máx.	Reducción
Sin protección	Parada súbita	551 kPa	—
Con válvula de alivio	Parada súbita	310 kPa	↓ 44 %

Tabla 11. Efecto de la válvula de alivio sobre la sobrepresión — Caso 2. Elaboración propia.

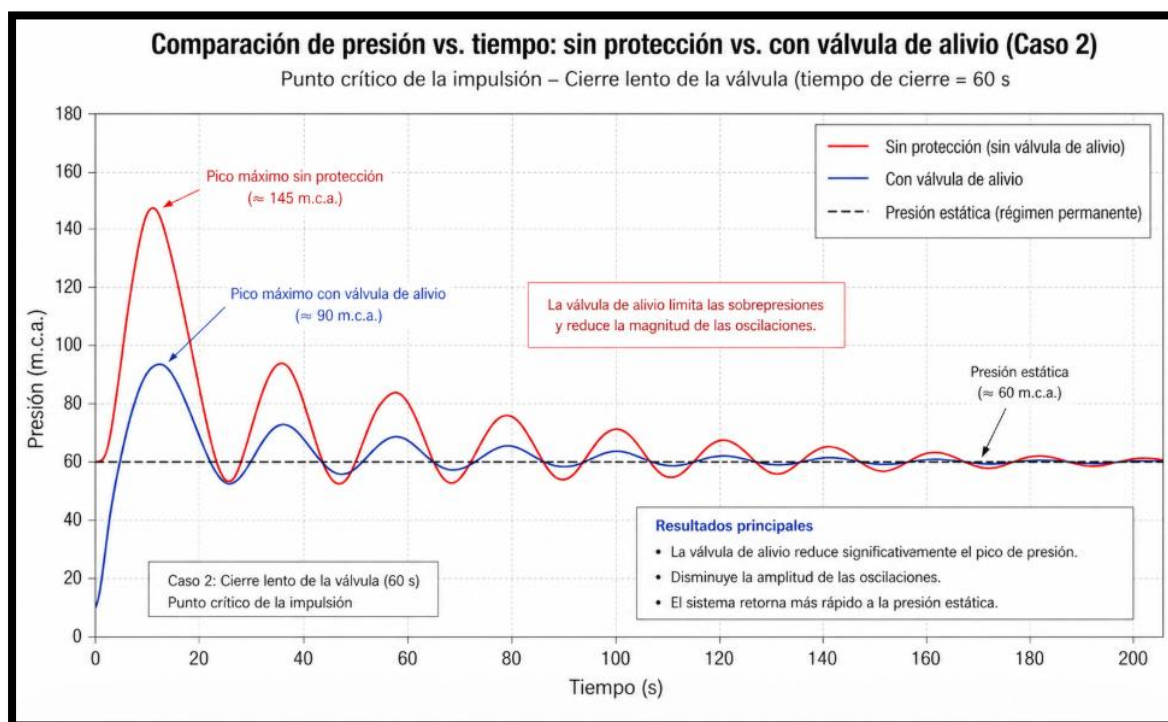


Figura 25 — Comparación de presión vs. tiempo: sin protección vs. con válvula de alivio (Caso 2)

CONCLUSIÓN CASO 2: La incorporación de la válvula de alivio reduce la sobrepresión en un 44 %, llevando el valor máximo a 310 kPa, muy por debajo de la presión nominal del PVC. Los sistemas de bombeo requieren obligatoriamente una evaluación de transitorios y la implementación de dispositivos de protección.

5. Comparación de casos y buenas prácticas

5.1 Comparación general entre los dos casos

Parámetro	Caso 1 — Gravedad	Caso 2 — Bombeo
Sobrepresión teórica	420 kPa	594 kPa
Sobrepresión simulada	389 kPa	551 kPa
Diferencia teórica/simulado	7.4 %	7.2 %
Presión mínima	−28 kPa	−65 kPa
Riesgo de cavitación	Bajo	Alto
Margen sobre PN	38.3 %	12.5 %
Estrategia de mitigación	Cierre lento	Válvula de alivio
Reducción por mitigación	49 %	44 %

Tabla 12. Comparación general entre los dos casos simulados. Elaboración propia.

5.2 Buenas prácticas de modelación en Allievi

Categoría	Buenas prácticas recomendadas
Definición del sistema	Representar fielmente la geometría real: longitudes, cotas, diámetros, rugosidades y accesorios.
Propiedades del fluido	Verificar densidad, módulo de elasticidad del agua y condiciones de temperatura antes de calcular la celeridad.
Condiciones iniciales	Asegurar que el régimen permanente esté correctamente calculado antes de simular el transitorio.
Configuración numérica	Seleccionar un paso de tiempo (Δt) coherente con la celeridad del sistema para evitar inestabilidades numéricas.
Validación de resultados	Comparar siempre con la ecuación de Joukowsky. Una diferencia $> 15\%$ puede indicar errores de configuración.
Análisis de escenarios	Evaluar maniobras críticas, fallas posibles y condiciones extremas para garantizar la seguridad del sistema.

Tabla 13. Buenas prácticas de modelación en Allievi. Elaboración propia.

5.3 Errores comunes en la modelación

Los siguientes errores son frecuentes en usuarios que se inician en el uso de Allievi:

- Definir tiempos de cierre o parada poco realistas (demasiado cortos o instantáneos sin justificación).
- No considerar la elasticidad de la tubería, lo que altera el cálculo de la celeridad.
- Ingresar valores inconsistentes de rugosidad o módulo de elasticidad.
- No revisar las condiciones iniciales de presión y caudal antes de ejecutar el transitorio.
- Utilizar pasos de tiempo (Δt) demasiado grandes, lo que genera inestabilidades numéricas.
- Ignorar los valores de presión mínima, enfocándose únicamente en las sobrepresiones.
- No verificar la coherencia de unidades al ingresar los datos del modelo.

Anexos

Anexo 1. Propiedades del agua a una atmósfera de presión

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Visc. dinámica (Pa·s)	Visc. cinemática (m²/s)
0	1000	1.788×10^{-3}	1.788×10^{-6}
10	1000	1.307×10^{-3}	1.307×10^{-6}
20	998	1.003×10^{-3}	1.005×10^{-6}
30	996	0.799×10^{-3}	0.802×10^{-6}
40	992	0.657×10^{-3}	0.662×10^{-6}

Fuente: White (1983).

Anexo 2. Módulo de elasticidad y celeridad por material

Material	Módulo E (GPa)	Celeridad típica (m/s)
Acero soldado	200	900 – 1200
Hierro dúctil	170	800 – 1100
Hierro fundido	120	700 – 1000
Asbesto cemento	20	600 – 900
PVC	2.7	300 – 500
PEAD	0.8	200 – 350

Fuente: Chaudhry (2014).

Anexo 3. Rugosidad absoluta para materiales de tuberías

Material	Rugosidad ks (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
Acero	0.046
Hierro galvanizado	0.15
Hierro fundido	0.15 – 0.26
Hierro dúctil	0.25
Concreto	0.30 – 3.00

Fuente: Saldarriaga (2016).

Anexo 4. Presiones nominales para tuberías de PVC

<i>Clase de presión</i>	<i>PN (kPa)</i>	<i>PN (m.c.a.)</i>
RDE-21	630	64.2
PN-6	600	61.2
PN-10	1000	102.0
PN-16	1600	163.2

Fuente: Norma NTC y especificaciones de fabricantes colombianos.

Bibliografía

Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients* (3rd ed.). Springer.

Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). A review of water hammer theory and practice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(10), 789–805. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:10\(789\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:10(789))

González Casas, F., Zamudio Huertas, E., & García Ubaque, C. A. (2015). Demostración y análisis del golpe de ariete por el método de los promedios aritméticos. *Tecnura, Edición especial*, 143–151.

ITA — Instituto Tecnológico del Agua, Universidad Politécnica de Valencia. (2015). *Allievi — Manual técnico* (Versión 2.0.0.0). Valencia, España.

López Cualla, R. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Lohrasbi, A., & Attarnejad, R. (2008). Water hammer analysis by characteristic method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4), 287–294. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.287.294>

Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes y riegos* (3.^a ed.). Alfaomega.

Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica general: fundamentos* (Vol. 1). Limusa.

Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1967). *Hydraulic transients*. McGraw-Hill.

Tullis, J. P. (1989). *Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients*. John Wiley & Sons.

Twyman, J. (2016). Cálculo de la velocidad de onda para el análisis del golpe de ariete. *Obras y Proyectos*, (20), 7–15. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000200007>

Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall.

Abreu, J. M., Cabrera, E., Izquierdo, J., & García-Serra, J. (1999). Flow modeling in pressurized systems revisited. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), 1154–1169. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:11\(1154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:11(1154))