

SISTEMA TRANSDOCENCIA V2.3

ISBN: 978-607-30-8049-1

DOI: 10.22201/iingen.9786073080491e.2023

Libia G. Carmona Paredes

Gabriel Castillo Hernández

Rafael Carmona Paredes



Series
**Instituto
de Ingeniería UNAM**

Publicación arbitrada

SM 15
OCTUBRE, 2023

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Publicación arbitrada

ISBN: 978-607-30-8049-1

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073080491e.2023>

SISTEMA TRANSDOCENCIA

v2.3

Libia G. Carmona Paredes¹

IIUNAM

LCarmonaP@iingen.unam.mx

Gabriel Castillo Hernández²

IIUNAM

gch@pumas.ii.unam.mx

Rafael Carmona Paredes³

IIUNAM

RCarmonaP@iingen.unam.mx

Serie Manuales

SM15

Octubre 2023

¹ Técnica Académica Titular B, Instituto de Ingeniería, UNAM

² Técnico Académico Titular B, Instituto de Ingeniería, UNAM

³ Investigador Titular A, Instituto de Ingeniería, UNAM

SISTEMA TRANSDOCENCIA v2.3

Primera edición, octubre de 2023

SM 15

D.R.© 2023 **Universidad Nacional Autónoma de México**

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

ISBN: 978-607-30-8049-1

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073080491e.2023>

La obra fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM). El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo PDF de 20.6 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar.

Términos de licenciamiento Creative Commons para protección de la difusión por terceras personas y derechos de autor de la presente obra: Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional



Prefacio

El presente documento es el manual del sistema TransDocencia v2.3, la primera versión fue desarrollada con el apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, DGAPA, UNAM. TransDocencia es la versión del Sistema de Simulación de Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión TRANS desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, especialmente preparada para los cursos de Hidráulica y Mecánica de Fluidos. La versión de docencia del sistema TRANS está limitada a simular un punto de abastecimiento y un punto de entrega, puede haber plantas de bombeo en serie, los equipos de bombeo entre cada estación de bombeo pueden ser diferentes, en cada planta de bombeo puede haber más de una bomba siendo todas ellas iguales.

Una conducción a presión es una tubería totalmente llena del fluido a transportar, en este caso, el fluido es agua. Un transitorio hidráulico es el fenómeno que se presenta entre dos condiciones de operación de un sistema, como cuando se modifica el volumen de agua por unidad de tiempo que se transporta, se suspende o se pone en marcha el sistema.

Los transitorios hidráulicos en conductos o tuberías a presión que se analizan con el TRANS, también son conocidos como golpe de ariete, se presentan en todos los sistemas hidráulicos, ocasionan variaciones de presión en el interior de las tuberías y son producidos por cambios en la velocidad de rotación de bombas y turbinas, cierre o apertura rápida de válvulas. Este tipo de transitorios generan las máximas y mínimas variaciones de presión a lo largo de las conducciones, ocurren después de realizar cambios muy rápidos en la forma de operación del sistema, como en los casos en que por falla en el suministro eléctrico los equipos de bombeo dejan de operar súbitamente. Cuando las presiones son mayores que la resistencia de las tuberías éstas se reventarán y cuando se presentan depresiones puede ocurrir el colapso de las tuberías o el fenómeno de separación de columna.

El fenómeno del golpe de ariete se analiza a partir de las ecuaciones dinámicas y de continuidad para tuberías elásticas y fluidos compresibles las cuales, en ocasiones, son de difícil comprensión a nivel licenciatura, es común que el tema se aborde a través de soluciones simplificadas en este nivel académico. Sin embargo, para diseñar sistemas hidráulicos con conductos a presión, como los acueductos que trabajan con tuberías completamente llenas de agua, no es suficiente considerar las soluciones que se obtienen con los métodos simplificados.

El presente documento, junto con el software TransDocencia, es una herramienta de apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje para estudiantes y profesores de licenciatura y posgrado. Al ser TransDocencia una versión del Sistema de Simulación de Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión, TRANS, en este caso dirigida a la docencia, también es una herramienta apropiada para los profesionales dedicados a diseñar acueductos formados por un punto de abastecimiento y un punto de entrega.

Ciudad Universitaria, Cd Mx
Junio 2023
Libia Carmona Paredes

Agradecimientos

Agradecemos al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación, PAPIME, DGAPA, UNAM dentro del cual se desarrolló la primera versión del sistema TransDocencia.

A los integrantes y estudiantes que han colaborado en el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, quienes han contribuido al enriquecimiento del archivo fotográfico y de información del Grupo, en particular a los Maestros en Ingeniería Alejandro Sánchez Huerta y Eduardo Rodal Canales por sus comentarios y observaciones realizadas como usuarios del sistema TransDocencia.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Resumen

El software TransDocencia es la versión para apoyo a la docencia del sistema TRANS desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM). Está enfocado a la enseñanza y comprensión de los transitorios hidráulicos que se presentan en los conductos que transportan agua a presión. TransDocencia contiene información de válvulas y equipos de bombeo reales, tomada de la información recabada por el Grupo de Hidromecánica del IIUNAM durante su participación en el diseño y revisión de la operación de acueductos. En el presente trabajo se indica cómo se usa TransDocencia. En los ejemplos incluidos se muestran todos los pasos que deben seguirse para realizar simulaciones, de tal forma que las personas interesadas podrán reproducirlos fácilmente, tomando como base los ejemplos es muy sencillo reproducir condiciones que comúnmente se presentan en la realidad. La versión actual de TransDocencia, contiene un módulo de graficación y consulta de resultados. Entre sus opciones está la animación de la propagación de la onda de presión a través de la tubería, la cual es de gran apoyo para explicar los cambios que suceden en el interior de las tuberías. En los anexos se presentan, los modelos matemáticos que permiten analizar transitorios por oscilación de masa y golpe de ariete. Además, el método de las características y los modelos matemáticos de las estructuras y elementos hidráulicos factibles de simular: tuberías, uniones de tuberías, torres de oscilación, tanques unidireccionales, cámaras de aire, válvulas de seccionamiento o control, válvulas de admisión y expulsión de aire y la operación de equipos de bombeo en flujo transitorio. También se incluyen procedimientos para obtener dimensiones preliminares de los dispositivos de control de transitorios mencionados.

Palabras clave: transitorio hidráulico, golpe de ariete, oscilación de masa, método de las características, estructuras de control de transitorios

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Abstract

The TransDocencia software is the teaching version of the TRANS system developed at the Institute of Engineering, UNAM (IIUNAM). It is focused on the teaching and understanding of hydraulic transients that occur in pipelines transporting water under pressure. TransDocencia contains information of real valves and pumping equipment, taken from the data bank of the Hydromechanics Group of the IIUNAM. This paper shows how to use TransDocencia. The examples included show all the steps to be followed to perform simulations, so any interested person can easily reproduce them. Based on the examples, it is very easy to reproduce conditions that commonly occur in reality. The current version of TransDocencia contains a graphing and results query module. Among its options is the animation of the pressure wave propagation through the pipe, which is of great support to explain the changes that occur inside the pipes. In the annexes, the mathematical models that allow the analysis of transients due to mass oscillation or water hammer are presented. In addition, the method of characteristics and mathematical models of the structures and hydraulic elements that can be simulated: pipes, pipe joints, oscillation tanks, unidirectional tanks, air chambers, sectioning or control valves, air inlet and outlet valves and the operation of pumping equipment in transient flow. Also included are procedures for obtaining preliminary dimensions of the above transient control devices.

Keywords: hydraulic transients, water hammer, mass oscillation, method of characteristics, control and surge protective devices

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Índice

Prefacio	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice.....	xiii
1. Introducción	1
2. Sistema TransDocencia v2.3	5
2.1 Descripción del sistema TransDocencia v2.3.....	5
3. Sistema CreaSistema	11
3.1 Pantalla principal del sistema CreaSistema	11
3.2 Menú principal	13
3.3 Elementos y eventos disponibles	17
3.4 Administrador de proyectos	19
3.5 Área de dibujo	21
3.6 Inspector de propiedades	22
3.7 Mensajes y errores	23
3.8 Tiempo de simulación e intervalo de integración	25
4. Elementos pasivos, no pueden modificar la operación estacionaria	27
4.1 Tuberías	28
4.2 Cambio de tubería o unión de tramos.....	30
4.3 Tanque en la frontera aguas arriba.....	31
4.4 Tanque en la frontera aguas abajo	32
4.5 Torre o tanque de oscilación	34
4.6 Cámara de aire.....	38
4.7 Tanque unidireccional	44
4.8 Válvula de admisión y expulsión de aire.....	49
5. Elementos activos, válvulas de movimiento programado y equipos de bombeo	53
5.1 Válvulas de movimiento programado o controlado	53
5.1.1 Válvula de control ubicada entre dos tramos de tubería.....	57
5.1.2 Válvula de control en la frontera aguas abajo	59
5.2 Paro súbito de equipos de bombeo.....	61
5.2.1 Suspensión súbita del bombeo cuando la planta de bombeo está en la frontera aguas arriba del sistema.....	61
5.2.2 Simulación del paro súbito de equipos de bombeo ubicados entre tramos de la conducción	67
6. Gráficas de resultados y reporte de la simulación.....	71

6.1	Animación de la onda de presión.....	72
6.2	Piezométricas máximas y mínimas en función de la posición	75
6.2.1	Formato del archivo con la topografía, trazo de la tubería o perfil del terreno	78
6.3	VARIABLES COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO	80
6.2.2	Carga piezométrica en función del tiempo	80
6.2.3	Gasto en función del tiempo	81
6.2.4	Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire en función del tiempo	81
6.2.5	Velocidad de equipos de bombeo en función del tiempo	83
6.2.6	Reporte de la simulación	83
7.	Ejemplos.....	85
7.1	Ejemplo 1. Cierre de válvula en la frontera aguas abajo	85
7.1.1	Animación de la onda de presión.....	90
7.1.2	Piezométricas máximas y mínimas	103
7.1.3	Cargas	104
7.1.4	Gastos	109
7.1.5	Reporte de la simulación	111
7.2	Ejemplo 2. Oscilación de masa usando el modelo de oscilación de masa.....	113
7.2.1	Solución analítica.....	114
7.2.2	Solución numérica	116
7.3	Ejemplo 3. Simulación del transitorio generado por el cierre de una válvula ubicada en la frontera aguas abajo de la conducción	119
7.3.1	Animación de la onda de presión.....	124
7.3.2	Piezométricas máximas y mínimas	129
7.3.3	Cargas	130
7.3.4	Gastos	135
7.3.5	Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire	141
7.3.6	Reporte de la simulación	142
7.4	Ejemplo 4. Simulación del transitorio generado por el paro súbito del bombeo.....	143
7.4.1	Simulación del transitorio	148
7.4.2	Resultados de la simulación	150
8.	Referencias.....	155
9.	Bibliografía	157
Anexos		161
A1	Oscilación de masa	161
A1.1	Modelo matemático de oscilación de masa.....	163
A1.1.1	Ecuación de la dinámica del agua en la tubería.....	164
A1.1.2	Ecuación de la dinámica del agua en el tanque 1	165
A2	Golpe de ariete.....	170
A2.1	Modelo matemático del golpe de ariete.....	171
A2.2	Método de las características.....	179
A3	Tuberías	185
A4	Cambio de tubería o tramo.....	187
A5	Modelo matemático de torres de oscilación y propuesta para obtener dimensiones preliminares	188
A5.1	Modelo matemático de torres de oscilación.....	188

A5.2	Propuesta para obtener dimensiones preliminares	190
A6	Modelo matemático de tanques unidireccionales y propuesta para obtener dimensiones preliminares	192
A6.1	Modelo matemático.....	192
A6.2	Propuesta para obtener dimensiones preliminares de tanques unidireccionales	193
A7	Modelo matemático de cámaras de aire y propuesta para obtener dimensiones preliminares	195
A7.1	Modelo matemático.....	195
A7.2	Propuesta para obtener dimensiones preliminares de cámaras de aire.....	199
A8	Modelo matemático de válvulas de admisión y expulsión de aire.....	204
A8.1	Determinación del diámetro de válvulas de admisión y expulsión de aire	207
A9	Modelo matemático de válvulas de movimiento controlado	211
A9.1	Válvula completamente cerrada	211
A9.2	Válvula parcialmente abierta o en movimiento.....	212
A10	Operación de equipos de bombeo en flujo transitorio.....	215
A10.1	Velocidad específica	216
A10.2	Operación de bombas con flujo transitorio	220
A10.3	Modelo matemático.....	226
	Notación.....	233

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

1. Introducción

Al fenómeno que ocurre durante el intervalo de tiempo que le toma a un sistema hidráulico pasar de una condición de operación en flujo permanente que fue perturbado, a otra condición de operación en flujo permanente se le llama transitorio hidráulico.

Algunas perturbaciones ocurren súbitamente como consecuencia de eventos imprevistos, otras son consecuencia de las maniobras que deben realizarse de manera programada y controlada para cambiar el modo de operación de los sistemas, como arranques y paros de equipos de bombeo o apertura y cierre de válvulas para modificar caudales. Durante el flujo transitorio que se desarrolla inmediatamente después haber ocurrido un evento imprevisto se presentan las máximas variaciones en la presión interna de las tuberías, en la velocidad del agua y en la velocidad de los elementos rodantes de bombas y turbinas, a éste se le llama transitorio rápido o golpe de ariete.

Cambios súbitos en el consumo de energía eléctrica en la red alimentada por un sistema hidroeléctrico y fallas en el suministro de energía eléctrica en plantas de bombeo, generan golpes de ariete. Un golpe de ariete puede causar daños con costos muy altos, tanto económicos como sociales. Los primeros, debido a las reparaciones que se tuvieron que realizar al sistema y los segundos, por la suspensión del servicio de entrega de agua o de generación de energía eléctrica.

El golpe de ariete se analiza a partir de un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales de primer orden acopladas obtenidas a partir de un balance de masa y momento aplicado a un volumen de control, las que en muchas ocasiones apenas son presentadas en los cursos de licenciatura y sólo se dan soluciones simplificadas. Para diseñar sistemas hidráulicos con conductos a presión, no es suficiente considerar las soluciones que se obtienen con los métodos simplificados, por lo que se ha preparado este manual estructurado de la siguiente manera.

En el Capítulo 2 se presenta el sistema TransDocencia v2.3, se indica cómo, con apoyo del sistema CreaSistema, se crean los sistemas hidráulicos a estudiar y se ejecutan las simulaciones de transitorios. Los ejecutables TransDocencia v2.3.exe y CreaSistema.exe, programados en Delphi 10.2, están disponibles <http://sitios.iingen.unam.mx/Transitorios-Hidraulicos/> y www.rua.unam.mx, ambos archivos deben estar en la misma carpeta.

En el Capítulo 3 se presenta el software CreaSistema, a través de éste se construyen gráficamente los sistemas hidráulicos, se proporcionan los datos que los caracterizan y se indica la maniobra que genera un transitorio. También se muestra cómo, a partir de un arreglo hidráulico y una maniobra determinada, se crean diferentes arreglos hidráulicos o se modifica el tiempo de ejecución de la maniobra.

En el Capítulo 4 se indica la información que debe proporcionarse para simular los elementos y estructuras hidráulicas que no generan transitorios que pueden simularse con TransDocencia v2.3, los cuales son: tuberías o tramos de tuberías, uniones de tramos, tanques de carga constante en las fronteras de la conducción, torre de oscilación, cámara de aire, tanque unidireccional y válvula de admisión y expulsión de aire. La información requerida se captura con el software CreaSistema.

En el Capítulo 5 se indica la información que debe proporcionarse para simular los elementos que tienen la capacidad de producir transitorios hidráulicos, las bombas y válvulas.

El Capítulo 6 trata sobre la consulta de resultados, se indica cómo interactuar con la animación que muestra la onda de presión, qué resultados se obtienen de las simulaciones, cómo grabar los archivos de resultados, copiar gráficas de resultados y se comenta el contenido del reporte de la simulación que se genera.

En el Capítulo 7 se presentan cuatro ejemplos de sistemas de conducción, a través de ellos se lleva de la mano al usuario en el uso del sistema TransDocencia v2.3, de tal forma que las personas interesadas pueden reproducirlos fácilmente.

Las referencias y bibliografía se presentan en el Capítulo 8 y Capítulo 9, respectivamente.

En el Anexo A1 y en el Anexo A2 se presentan, respectivamente, los modelos matemáticos de los transitorios de oscilación de masa y golpe de ariete y los métodos numéricos para resolverlos. Del Anexo A3 al Anexo A8 se presentan los modelos

matemáticos de los elementos y estructuras factibles de simular en TransDocencia y, cuando aplica, un procedimiento para determinar dimensiones preliminares. En el Anexo A9 se indica cómo se simula la operación de válvulas de movimiento programado. Por último, el Anexo A10 está dedicado al modelo matemático para simular la operación transitoria de equipos de bombeo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

2. Sistema TransDocencia v2.3

2.1 Descripción del sistema TransDocencia v2.3

El sistema de simulación de transitorios TransDocencia v2.3 está integrado por los ejecutables TransDocencia v2.3.exe y CresSistema.exe. Ambos están disponibles en <http://sitios.iingen.unam.mx/Transitorios-Hidraulicos> y www.rua.unam.mx, los ejecutables deben estar en la misma carpeta.

TransDocencia v2.3.exe es el encargado de resolver el modelo matemático de: golpe de ariete, maniobras, eventos, elementos y estructuras hidráulicas que forman la conducción. Con CresSistema.exe se crea gráficamente el sistema hidráulico y se dan las características de los elementos que lo componen.

La simulación del estado transitorio es el resultado de la simulación conjunta de los elementos y estructuras que forman a la conducción y los eventos que suceden durante el periodo de simulación.

Los elementos y estructuras pasivos que pueden simularse y se describen en el Capítulo 4 son los siguientes:

- cámaras de aire
- descarga ahogada en un tanque de carga constante
- tanque de suministro con carga constante
- tanques o torres de oscilación
- tanques unidireccionales
- tuberías
- válvulas de admisión y expulsión de aire

Los eventos que pueden simularse y se describen en el Capítulo 5 son los siguientes:

- apertura y cierre de válvulas

- paro súbito (disparo) de equipos de bombeo en la frontera aguas arriba (extremo inicial de la conducción)
- paro súbito (disparo) de plantas de bombeo ubicadas a lo largo del acueducto

La simulación de un transitorio parte de las condiciones de operación en flujo permanente, por lo que es indispensable hacer un análisis previo de la operación del sistema en dicho estado de operación.

La estructura física de una conducción es el conjunto de las características de los tramos de tubería y de los elementos y estructuras hidráulicas que la forman. Los eventos hidráulicos que suceden en el sistema hidráulico determinan la forma particular de operar de cada sistema. Con la información física e hidráulica se crea el archivo de datos que sirve de base para simular transitorios. Las unidades métricas son las del SI.

En la Figura 2.1 se muestra la pantalla principal de TransDocencia v2.3, al seleccionar el botón *edita o crea el sistema hidráulico* se ejecuta el sistema CreaSistema.exe, como se muestra en la pantalla de la Figura 2.2. A través del software CreaSistema, se crea el sistema hidráulico y se indica la maniobra que genera el transitorio, la información se graba en un archivo tipo texto al que se referirá como archivo de datos. Para realizar la simulación del transitorio se selecciona de la Figura 2.1 el botón *simula transitorio*. Los archivos ejecutables TransDocencia.exe y CreaSistema.exe deben estar en la misma carpeta.

Al seleccionar *simula transitorio* se muestra la pantalla de la Figura 2.3 en la que se indica el nombre del archivo de datos y si se tiene la información de la topografía, el nombre del archivo con las coordenadas de los puntos que determinan el perfil topográfico, este archivo debe estar grabado en formato csv (números separados por comas). Para calcular el transitorio se selecciona *Simula transitorio*. En caso de no haberse detectado errores durante la simulación, se muestra el mensaje de la Figura 2.4 y se activan los botones de la sección “Gráficas de resultados y reporte de la simulación”, Figura 2.5.

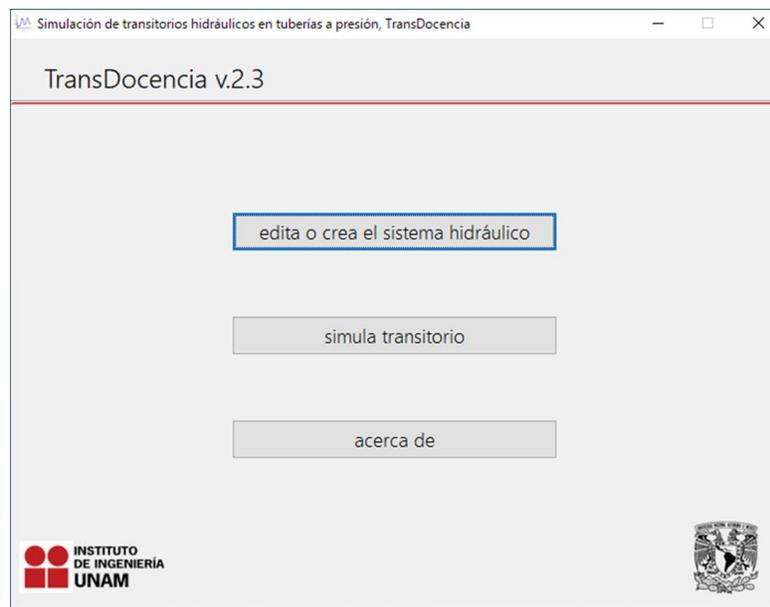


Figura 2.1 Pantalla principal del software TransDocencia v.2.3

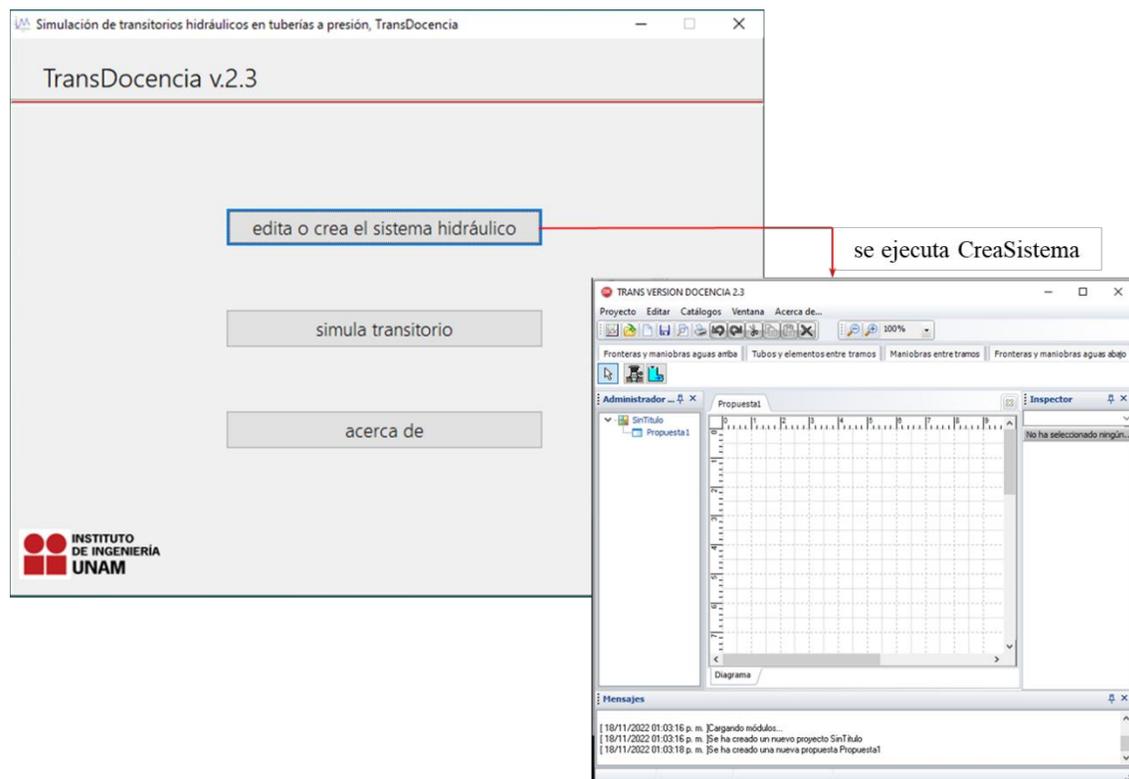


Figura 2.2 Al seleccionar *edita o crea el sistema hidráulico*, se abre la pantalla principal del software CreaSistema

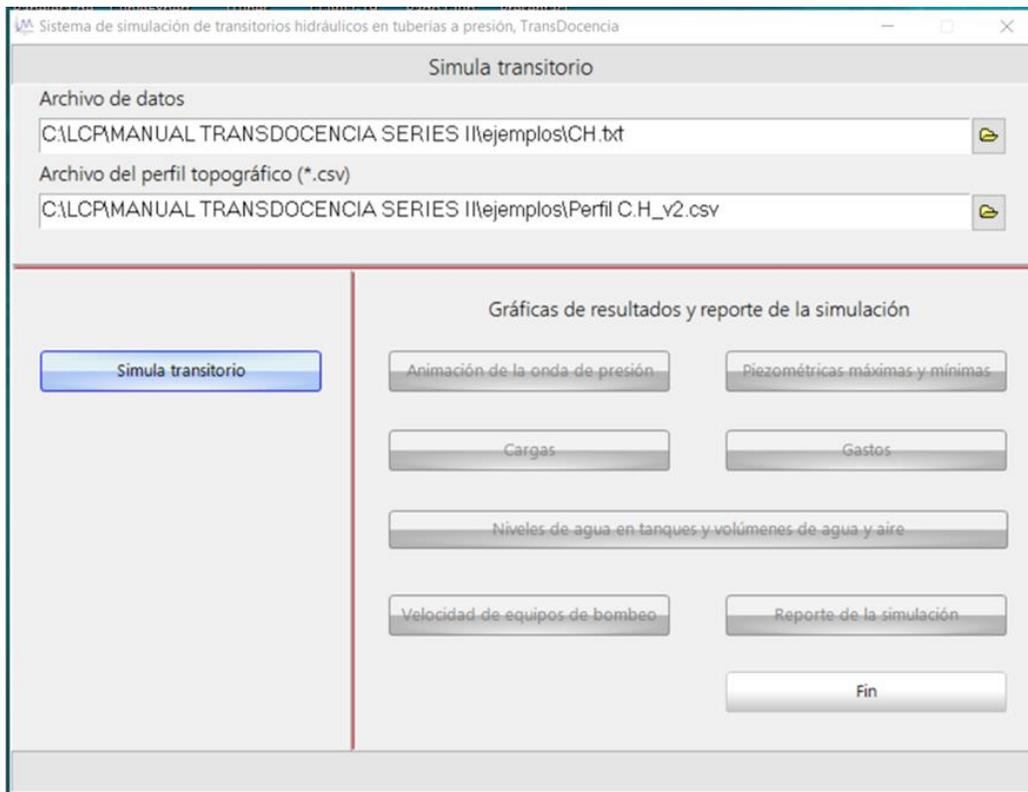


Figura 2.3 Pantalla para simular un transitorio

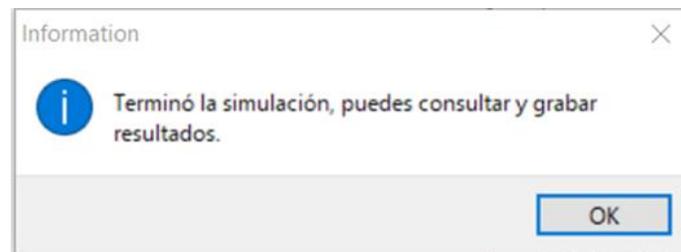


Figura 2.4 Terminó con éxito la simulación

Los resultados de las simulaciones se almacenan en cinco archivos con formato csv y se crea un archivo tipo texto que contiene el reporte de la misma. Con los botones del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” de la Figura 2.5 se pueden consultar, a través de gráficas, los resultados obtenidos, los archivos de resultados también pueden grabarse para que el usuario pueda analizarlos o dar el formato deseado para su presentación con el software de su preferencia.

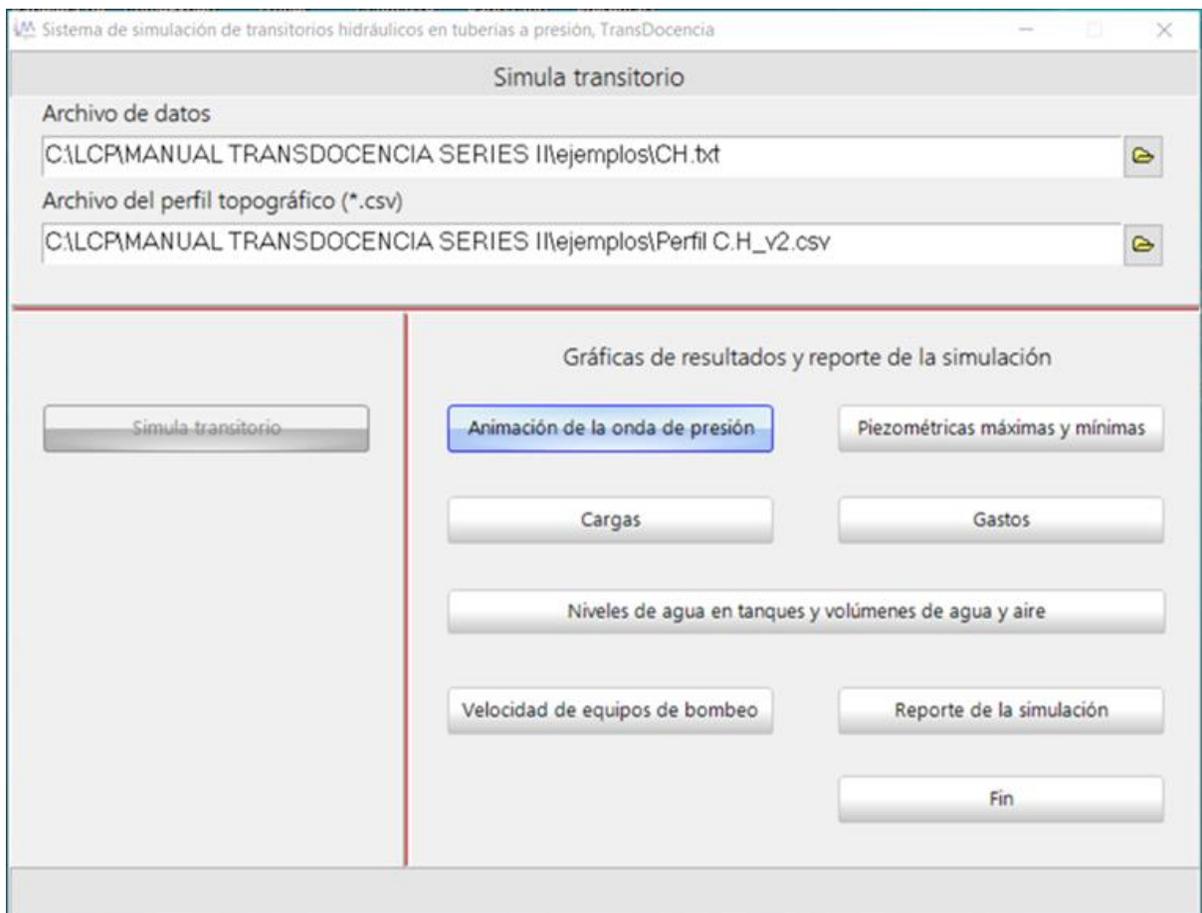


Figura 2.5 Al terminar la simulación pueden consultarse los resultados obtenidos

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

3. Sistema CreaSistema

El sistema TransDocencia v2.3 permite simular tanto la operación en flujo permanente como la operación en flujo transitorio de sistemas hidráulicos que conducen agua a presión, como los sistemas de bombeo o acueductos y sistemas de hidrogenación. La descripción física del sistema hidráulico, la condición de operación en flujo permanente previa a presentarse un transitorio y el evento o maniobra que produce el transitorio se guardan en un archivo de datos tipo texto que se genera a través del sistema CreaSistema.

CreaSistema.exe puede ejecutarse seleccionando *edita o crea el sistema hidráulico* de la pantalla de la Figura 2.1 (siempre y cuando los archivos TransDocencia.exe y CreaSistema.exe estén en la misma carpeta) o llamando a CreaSistema.exe.

CreaSistema es un sistema tipo CAD, con el que se crea gráficamente un sistema hidráulico, los elementos hidráulicos como tuberías, tanques, válvulas, bombas, etc., se representan con íconos que se seleccionan y arrastran con el ratón a un área de dibujo para formar la conducción hidráulica.

Es importante mencionar que CreaSistema no revisa que la información proporcionada describa una operación hidráulica correcta.

3.1 Pantalla principal del sistema CreaSistema

La Figura 3.1 es la pantalla principal de CreaSistema, en ésta se identifican las seis áreas principales de trabajo.

1. Menú principal. En esta área se especifican las acciones que pueden realizarse con los proyectos, elementos administrativos y de información.
2. Elementos y eventos disponibles. En esta área se localizan todos los elementos disponibles para crear la estructura física del sistema hidráulico y los eventos

o maniobras que pueden realizarse, el usuario selecciona un ícono con el ratón y lo arrastra al área de dibujo.

3. Administrador de proyectos. En esta área se muestran las diferentes propuestas que constituyen un proyecto, en su versión más simple un proyecto posee una sola propuesta (Sección 3.2).
4. Área de dibujo. En este espacio se crea gráficamente el sistema hidráulico.
5. Inspector de propiedades. Cada elemento hidráulico posee atributos que lo describen e identifican, como su color para mostrarlo gráficamente, nombre, dimensiones físicas y según sea el caso, condiciones de operación en flujo permanente o la forma de realizar una maniobra.
6. Mensajes. En este espacio se muestran comentarios, advertencias, errores y en general cualquier información que pueda ser útil al usuario para crear correctamente el sistema hidráulico.

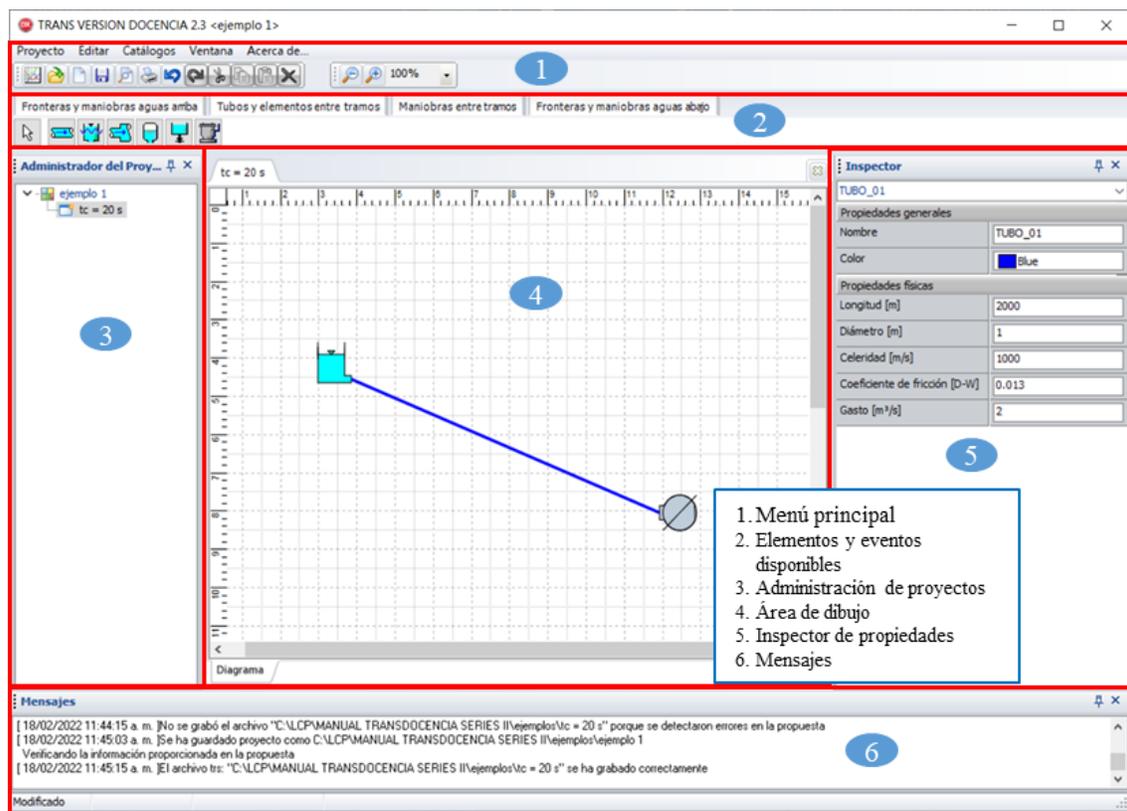


Figura 3.1 Pantalla principal del sistema CreaSistema

3.2 Menú principal

En la sección del menú principal, además de incluir los íconos conocidos para abrir archivos, hoja nueva, guardar archivo, imprimir, acercar o alejar (zoom), etc., contiene las opciones que se presentan a continuación.

- Proyecto. La pestaña Proyecto da acceso a la administración de proyectos y propuestas (Figura 3.2).
- Editar. Con la pestaña Editar se tiene acceso al comando de deshacer y seleccionar todo el dibujo del sistema hidráulico (Figura 3.3).
- Catálogos. El sistema CreaSistema contiene información con la que se simula en TransDocencia la operación de bombas en flujo transitorio (ver Anexo A10) y cierres o aperturas de válvulas de movimiento controlado (ver Anexo A9). Al seleccionar la pestaña Catálogos, se despliega el submenú que se muestra en la Figura 3.4 a través del cual se selecciona el tipo de elemento que quiere utilizarse.

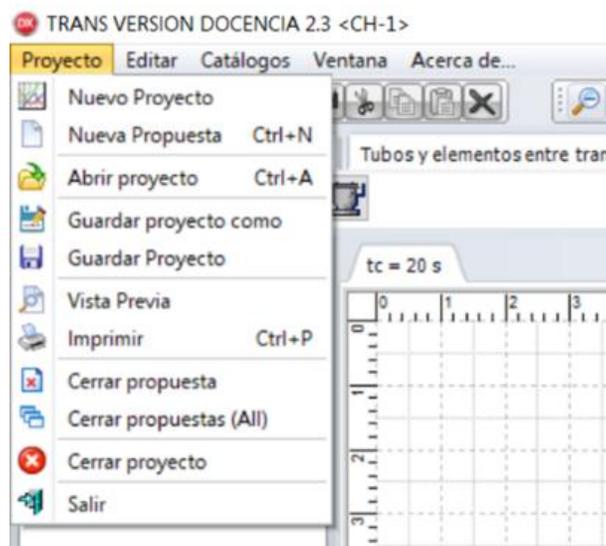


Figura 3.2 Opciones de la pestaña Proyecto

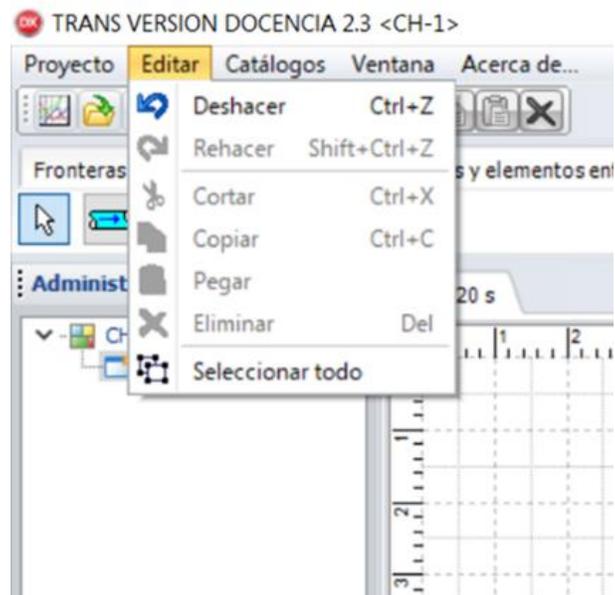


Figura 3.3 Opciones de la pestaña Editar

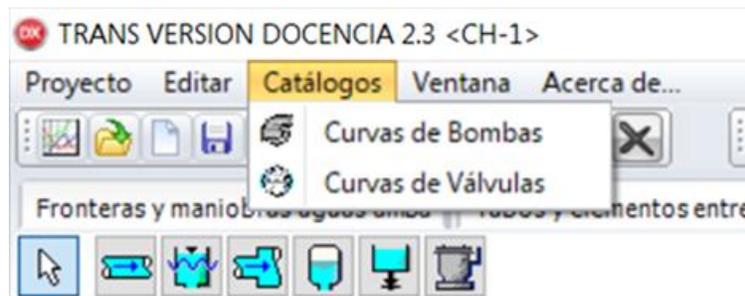


Figura 3.4 Opción Catálogos

El catálogo de curvas de bombas contiene curvas de operación de bombas en flujo transitorio para diferentes tipos de bombas (velocidades específicas $N_s = 29, 35, 38, 44, 46, 147$ y 261 en $[\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{ m}^{-0.75}]$ equivalentes a $n_s = 1498, 1800, 1950, 2270, 2400, 7600$ y 13500 en $[\text{rpm gpm}^{0.5} \text{ pies}^{-0.75}]$). Al elegir una velocidad específica se muestran tanto las curvas características de carga y momento como las coordenadas de los puntos con un intervalo de 5° (ver Anexo A10), Figura 3.5.

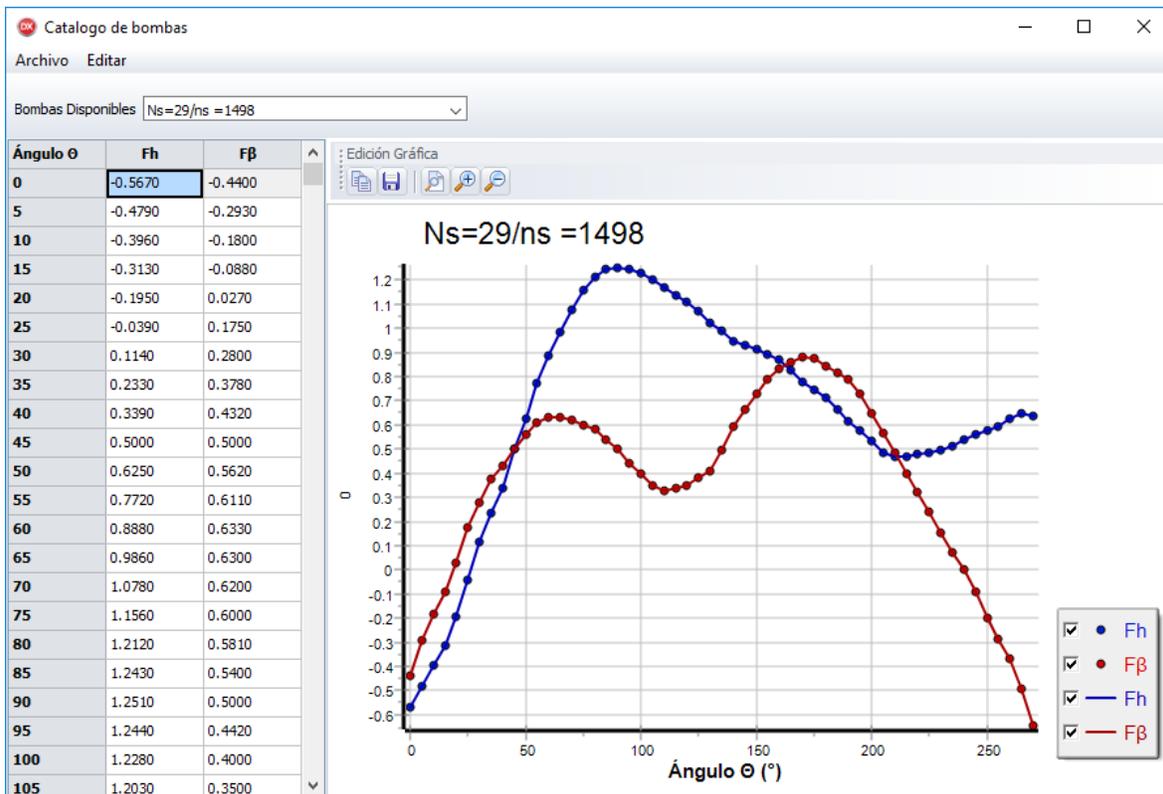


Figura 3.5 Información para simular la operación, en flujo transitorio, de bombas con velocidad específica $N_s = 29$

El catálogo de curvas de válvulas contiene la información para simular el cierre y apertura de válvulas esféricas y de mariposa. En la Figura 3.6 se muestra la gráfica del coeficiente de pérdida de carga adimensional en función del porcentaje de apertura de una válvula esférica. La operación de la válvula se simula a través del polinomio (ver Anexo A9) mostrado en la parte inferior de la Figura 3.6.

- Ventana. A través de las opciones de esta pestaña (Figura 3.7) puede modificarse la vista de la pantalla principal de CreaSistema (Figura 3.1).

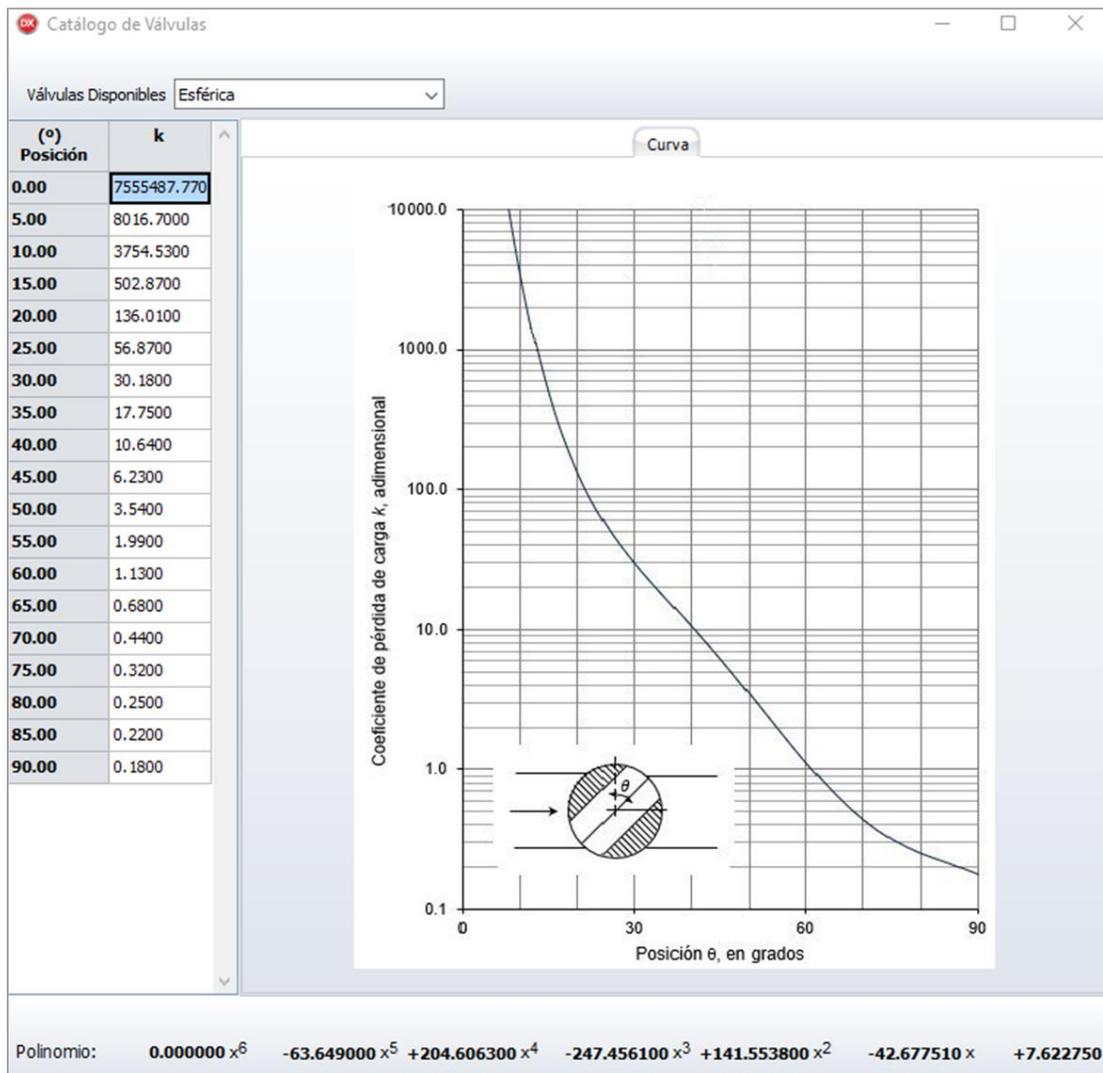


Figura 3.6 Información para simular el funcionamiento de válvulas esféricas

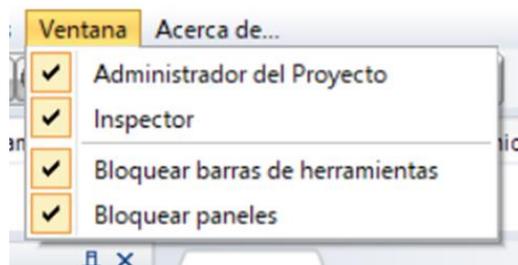


Figura 3.7 Opciones para modificar la pantalla principal de CreaSistema

3.3 Elementos y eventos disponibles

A través de la sección 2 de la pantalla principal de CreaSistema (Figura 3.1) se tiene acceso a todos los elementos y maniobras o eventos que pueden simularse en TransDocencia. Cada pestaña de esta sección agrupa algunos de ellos como se indica a continuación. En el Capítulo 4 se indica cómo se simulan los elementos pasivos (elementos con los que no se pueden realizar maniobras ni eventos) y en el Capítulo 5 cómo se simulan los elementos activos, válvulas de movimiento controlado y bombas.

- Fronteras y maniobras aguas arriba. Al seleccionar la pestaña Fronteras y maniobras aguas arriba, se muestran los íconos que representan la suspensión súbita del bombeo en la frontera aguas arriba (no hay línea de succión, se considera una maniobra o un evento) y al elemento tanque de carga constante o embalse de carga constante que impone la condición de carga constante en la frontera aguas arriba (Figura 3.8).

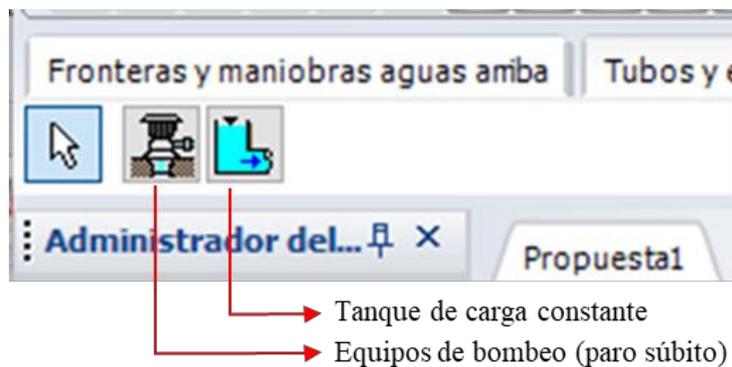


Figura 3.8 Elementos activo y pasivo que pueden simularse en la frontera aguas arriba de la conducción

- Tubos y elementos entre tramos. En esta pestaña están agrupados los elementos y estructuras hidráulicas que no generan transitorios (elementos pasivos) y tampoco pueden estar en los extremos de la conducción, que son: tramos de tubería, tanques o torres de oscilación, uniones de tuberías o cambio de tramo, cámaras de aire, tanques unidireccionales y válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA), ver Figura 3.9.

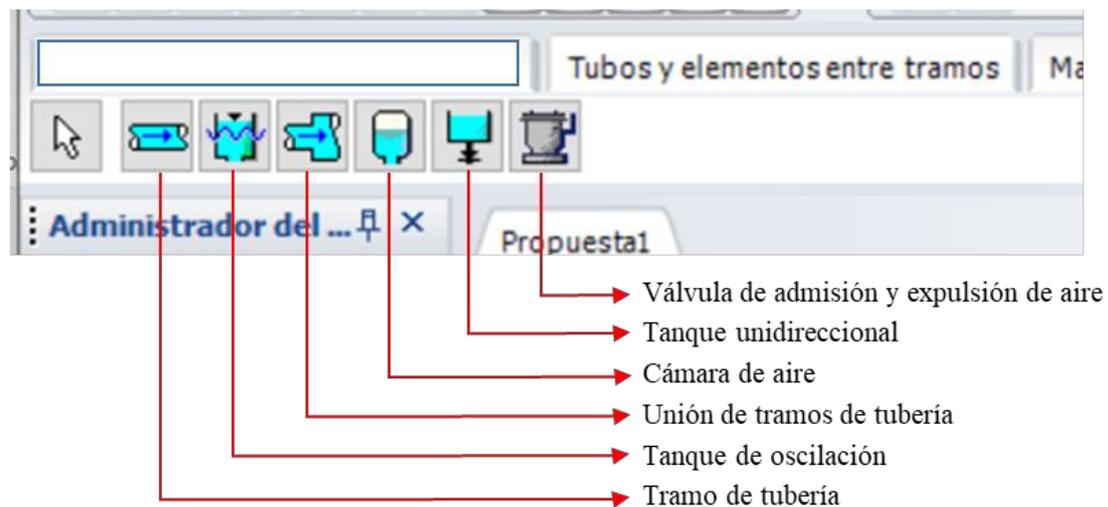


Figura 3.9 Elementos pasivos, siempre están entre dos tramos de tubería, excepto los tramos de tubería

- Maniobras entre tramos. En esta pestaña están disponibles los elementos activos, válvula de movimiento controlado y equipos de bombeo ubicados a lo largo de la conducción (Figura 3.10).

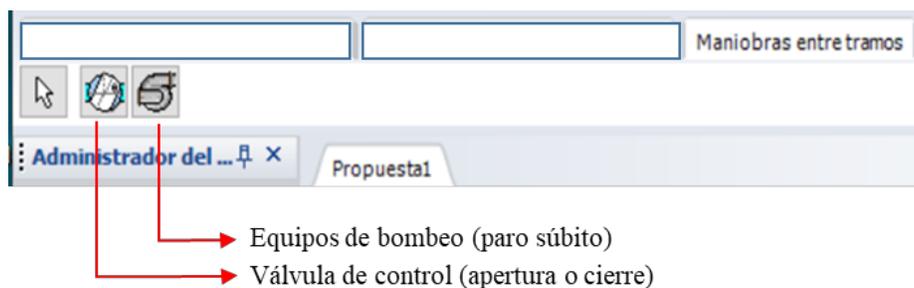


Figura 3.10 Elementos activos a lo largo de la conducción

- Fronteras y maniobras aguas abajo. En la pestaña Fronteras y maniobras aguas abajo están disponibles el elemento activo válvula de movimiento controlado y el pasivo tanque de carga constante, Figura 3.11.

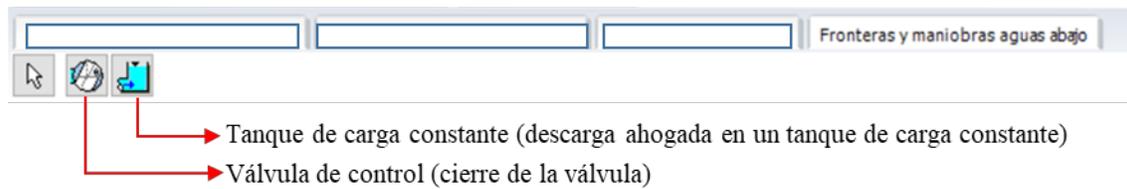


Figura 3.11 Elementos activo y pasivo en la frontera aguas abajo de la conducción

3.4 Administrador de proyectos

Un proyecto se refiere a un sistema particular de conducción de agua, por ejemplo, acueducto AguaPura o sistema hidroeléctrico CH-1.

Los transitorios hidráulicos se producen cuando se cambia, de manera programada o sorpresiva, la operación de los sistemas. Por ejemplo, cuando se presenta un problema en la red de distribución eléctrica de un sistema de hidrogenación de tal manera que debiera suspenderse la generación de energía eléctrica, lo que a su vez implica parar la operación de las turbinas y suspender el ingreso de agua a las mismas cerrando sus válvulas de entrada. El cierre de las válvulas genera un incremento en la presión interna de las tuberías, dependiendo del intervalo de tiempo que tarda la maniobra de cierre de válvulas será la severidad del transitorio.

Para analizar la relación que existe entre el incremento de presión en la tubería y el tiempo de cierre de las válvulas se pueden realizar simulaciones del transitorio para diferentes tiempos de cierre, para cada tiempo de cierre se puede crear una propuesta. Entonces, el proyecto CH-1 tendría igual número de propuestas que tiempos de cierre propuestos.

En la Figura 3.12 se muestra el Administrador del Proyecto, cuando se ejecuta CreaSistema.exe por primera vez, el proyecto se llama “SinTitulo” y la propuesta “Propuesta1”, ambos sin información. Para cambiar el nombre del proyecto se elige del menú principal la opción “Proyecto” y después “Guardar proyecto como” (Figura 3.2). El nombre de la propuesta se modifica presionando el botón derecho del ratón sobre la leyenda Propuesta1 (Figura 3.12).

Comúnmente, la primera propuesta contiene la estructura más simple de la conducción, para modificar alguna de sus características conviene duplicar la propuesta y entonces hacer las modificaciones, para ello se presiona el botón derecho del ratón sobre el nombre de la propuesta para que se despliegue el menú de la Figura 3.13 y entonces seleccionar Duplicar propuesta. Otra forma de duplicarla es presionando el botón derecho del ratón sobre la pestaña que está arriba del área del dibujo con el nombre de la propuesta que desea duplicarse.

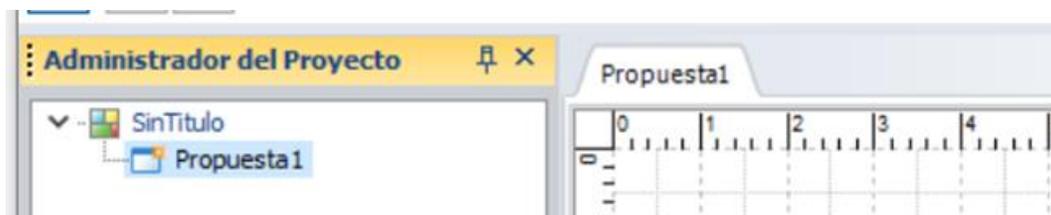


Figura 3.12 El proyecto se llama “SinTitulo” y la propuesta “Propuesta1”

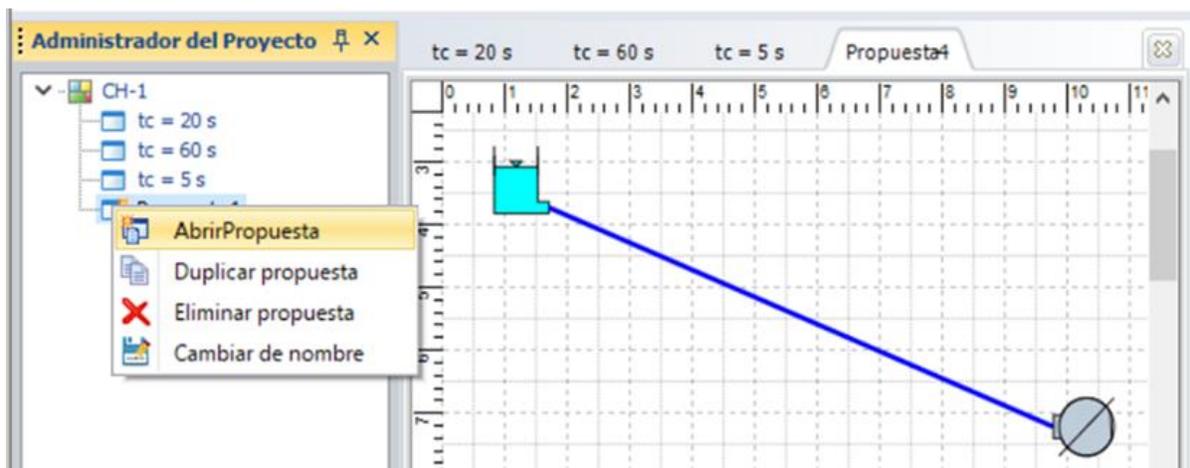


Figura 3.13 Seleccionar con el botón derecho del ratón el nombre de la propuesta para duplicar, eliminar o cambiar nombre

3.5 Área de dibujo

En el área de dibujo (Figura 3.1) se traza el sistema hidráulico utilizando los íconos de las componentes hidráulicas que se muestran de la Figura 3.8 a la Figura 3.11.

Todas las componentes se unen con tubos. Para copiar un tipo de componente que se va a utilizar más de una vez, se presiona el botón derecho del ratón sobre sobre la componente, se despliega el menú de la Figura 3.14, se selecciona Copiar, se vuelve a presionar el botón derecho del ratón en cualquier sitio del área de dibujo y se selecciona Pegar.

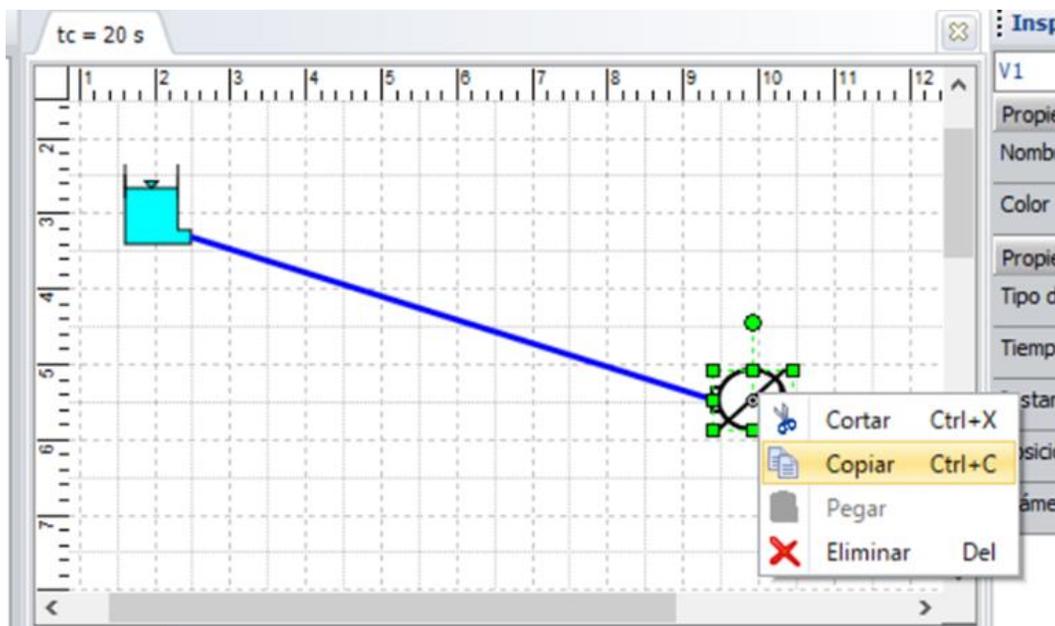


Figura 3.14 Las componentes de un esquema pueden copiarse presionando el botón derecho del ratón sobre la misma componente

Todas las componentes, excepto las tuberías, tienen un pequeño cuadro de color amarillo (Figura 3.15), estos cuadros sirven para unir por medio de una tubería un elemento hidráulico con otro. Una forma de unir dos elementos es colocando el cursor sobre uno de sus cuadros amarillos (el cursor cambia de una flecha a una mano), se presiona el botón del ratón sobre ese cuadro y sin dejar de presionar se arrastra el ratón hasta el cuadro amarillo del otro elemento. Todos los elementos hidráulicos del esquema deben quedar necesariamente conectados.

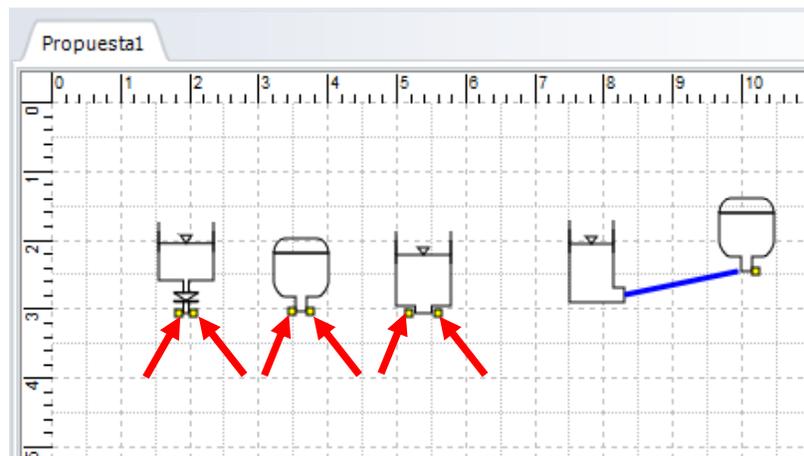


Figura 3.15 A través de los cuadros amarillos se unen los elementos a través de tubos para formar la conducción

3.6 Inspector de propiedades

Todos los elementos que se agregan al área de dibujo tienen características propias, la información necesaria para simular su forma de operación se proporciona a través del campo llamado Inspector. Como ejemplo, en la Figura 3.16 se muestran los datos que se deben proporcionar para caracterizar una tubería.

Inspector	
TUBO_01	
Propiedades generales	
Nombre	TUBO_01
Color	Blue
Propiedades físicas	
Longitud [m]	2000
Diámetro [m]	1
Celeridad [m/s]	1000
Coefficiente de fricción [D-W]	0.013
Gasto [m³/s]	2

Figura 3.16 Información con la que se representa una tubería

3.7 Mensajes y errores

Durante el llenado de los campos de captura del Inspector se valida la información que se proporciona, cuando hay un error o se quiere guardar la propuesta sin haber completado la información, en área de mensajes (Figura 3.1) se escribe un mensaje notificando el error cometido.

En la Figura 3.17 se muestra el caso en que se quiso guardar la propuesta antes de proporcionar la información de tubo, como puede verse en el área de mensajes, se menciona con color rojo que hubo un error en la longitud del tubo TUBO_01 y en el siguiente renglón se notifica que no se grabó el archivo con la propuesta.

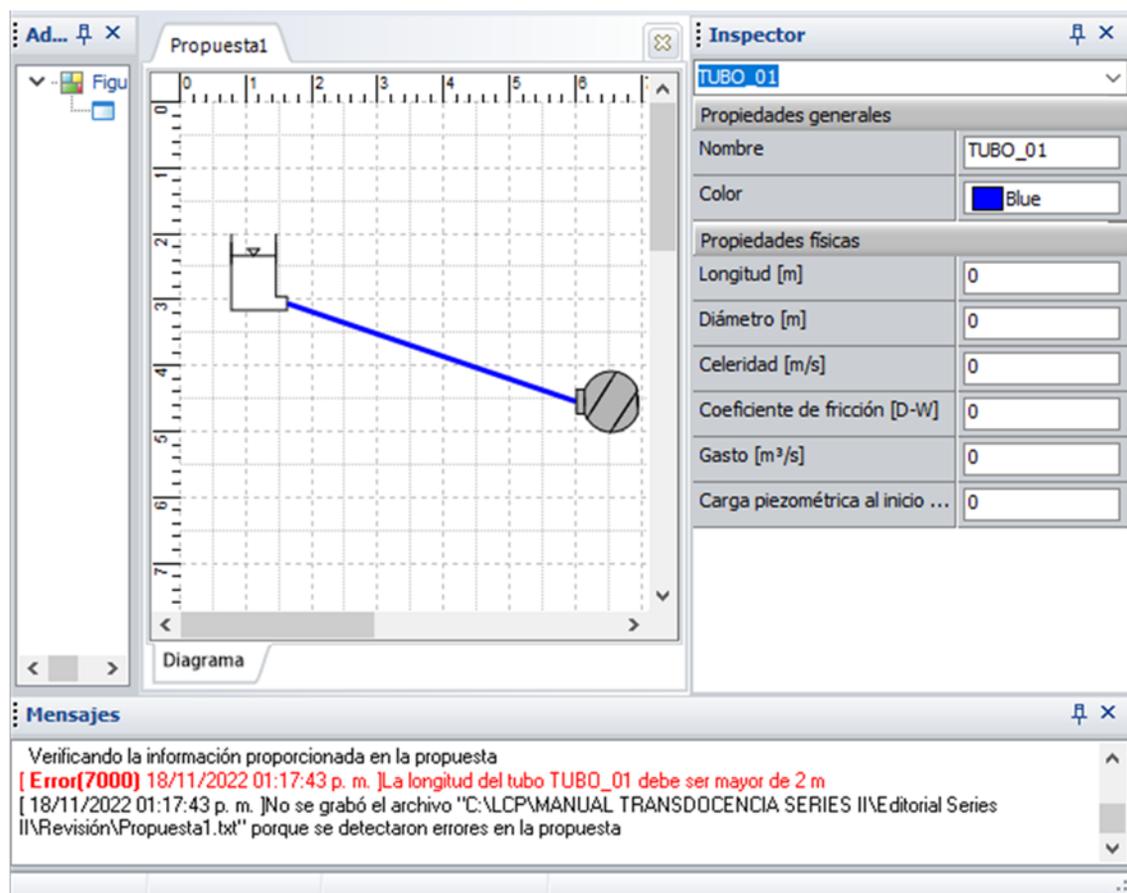


Figura 3.17 En el área de mensajes se mencionan los errores que se pudieron haber cometido al proporcionar la información de los elementos hidráulicos

Cuando los datos de la conducción están completos, todos los elementos conectados y se da la orden de guardar proyecto, en el área de mensajes se indica que se está realizando una verificación de la información de la propuesta, en caso de no haber habido errores, se despliega la pantalla de la Figura 3.18 en donde se pide el tiempo de simulación, en el área de mensajes se indica que se ha grabado correctamente el archivo con la propuesta y la ruta en donde se grabó. La propuesta se graba en un archivo tipo texto y el proyecto en un archivo con extensión trs.

Es importante mencionar que CreaSistema hace una validación de datos, este sistema no revisa que la información proporcionada describa una operación hidráulica correcta.

Finalmente, se muestra la pantalla de la Figura 3.19 indicando que la simulación de la operación hidráulica, debe realizarse desde la pantalla principal de TransDocencia (Figura 2.1).

La pantalla de la Figura 3.18 se muestra cuando todos los elementos están conectados y todos los datos proporcionados aceptados.

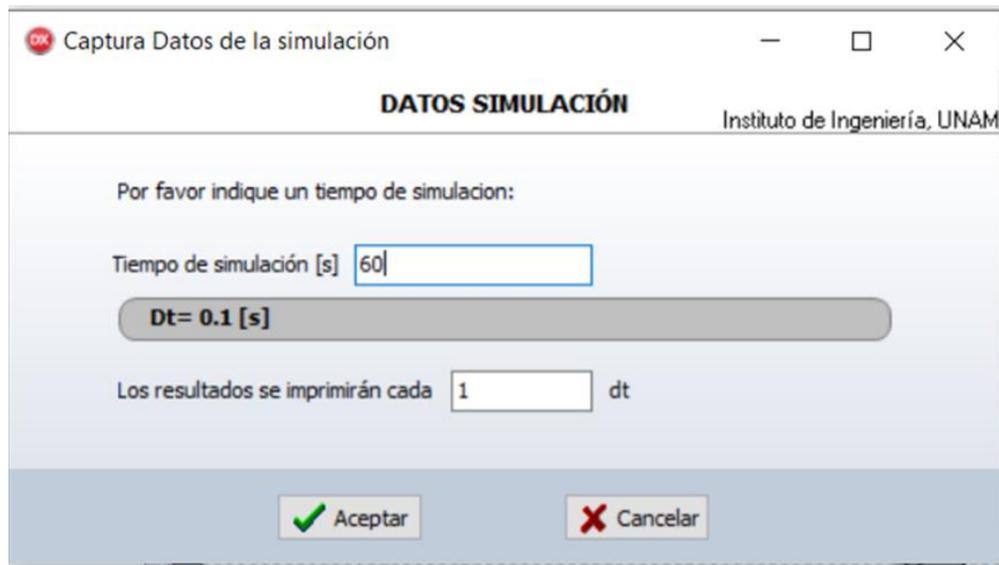


Figura 3.18 En caso de no haber errores en los datos y todos los elementos están conectados, se pide el tiempo de simulación, intervalo de tiempo que se desea simular

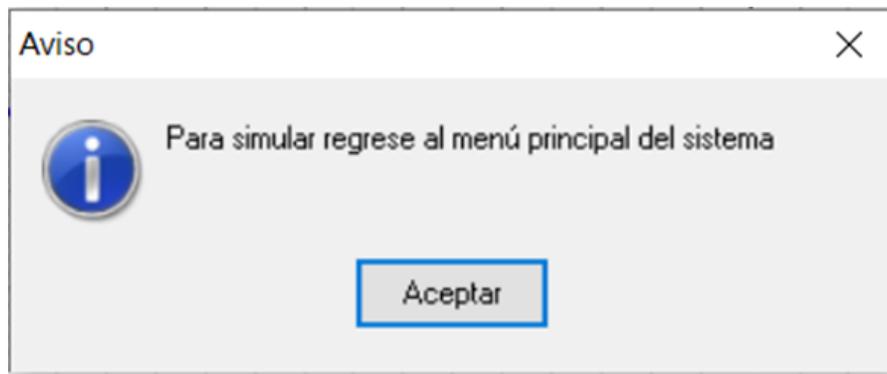


Figura 3.19 La simulación de la operación hidráulica se realiza desde la pantalla principal de TransDocencia (Figura 2.1)

3.8 Tiempo de simulación e intervalo de integración

En la pantalla de la Figura 3.18 se pide el tiempo de simulación, éste debe ser tal que se tenga la certeza de que todas las variables involucradas hubieran alcanzado sus valores extremos.

Cuando no hay tanques de oscilación ni cámaras de aire, se recomienda que se simulen al menos 10 ciclos completos de la onda de presión, es decir, el tiempo de simulación debe ser mayor o igual a $40L/a$, siendo L en m, la longitud total de la conducción y a en m/s, la celeridad mínima en la conducción.

Cuando hay pozos de oscilación o cámaras de aire, la dinámica del transitorio se modifica, de tal forma que de ser un transitorio rápido cambia a un transitorio lento. Entonces, el tiempo de simulación debe ser lo suficientemente grande para observar, por lo menos, dos mínimos y dos máximos de las oscilaciones del nivel del agua en estas estructuras, con ello se sabe si se vacían o se derrama el agua, se verifica que la amplitud de las oscilaciones disminuya y los niveles de agua en estas estructuras tiendan a un nivel constante, el correspondiente al estado final del transitorio.

El intervalo de integración para resolver el modelo de golpe de ariete utilizando el método de las características (ver Anexo A.2), denotado como Dt en la Figura 3.18, lo determina TransDocencia. La dimensión de la malla de cálculo debe satisfacer dos condiciones: i) el intervalo de integración debe ser menor o igual a 0.1 s ($\Delta t \leq 0.1$) y ii) el

tramo de la conducción cuya longitud es la más pequeña, debe tener al menos tres puntos de cálculo, los de sus extremos y otro a la mitad.

Para el propósito de TransDocencia se recomienda que la longitud mínima de los tramos sea de 100 m, para evitar que los archivos de resultados sean muy grandes, en particular el de la animación de la onda de presión.

4. Elementos pasivos, no pueden modificar la operación estacionaria

En general, los sistemas con conducciones de agua a presión están formados por tuberías de diferentes características, elementos hidromecánicos e hidráulicos y por estructuras cuyo objetivo es proteger la integridad del sistema ante las variaciones de presión que se presentan en el interior de las tuberías durante los transitorios hidráulicos generados por eventos que ocurren de manera sorpresiva o maniobras que se realizan en su operación.

En este capítulo se indica cómo se simulan en el sistema TransDocencia los elementos y estructuras hidráulicas con los que no se puede modificar la operación estacionaria de los sistemas (elementos pasivos), los cuales se muestran en la Figura 4.1.

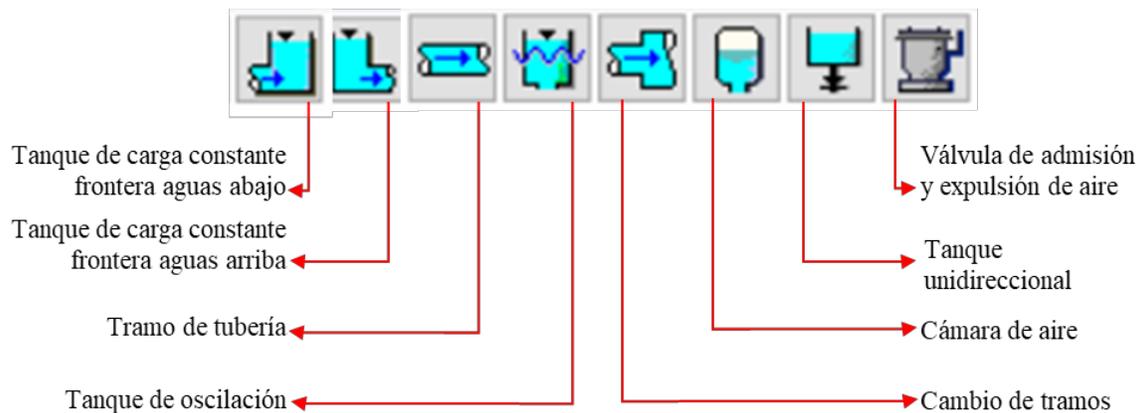


Figura 4.1 Elementos y estructuras hidráulicas con los que no se puede modificar la operación estacionaria

4.1 Tuberías

Existen dos formas para dar de alta un tramo de tubería, las que se indican a continuación.

1. Se selecciona la pestaña Tubos y elementos entre tramos y se elige el ícono señalado en la Figura 4.2.
2. Después de haber dado de alta cualquier tipo de elemento, se selecciona el cuadro amarillo de ese elemento y se arrastra el ratón, Figura 4.3.

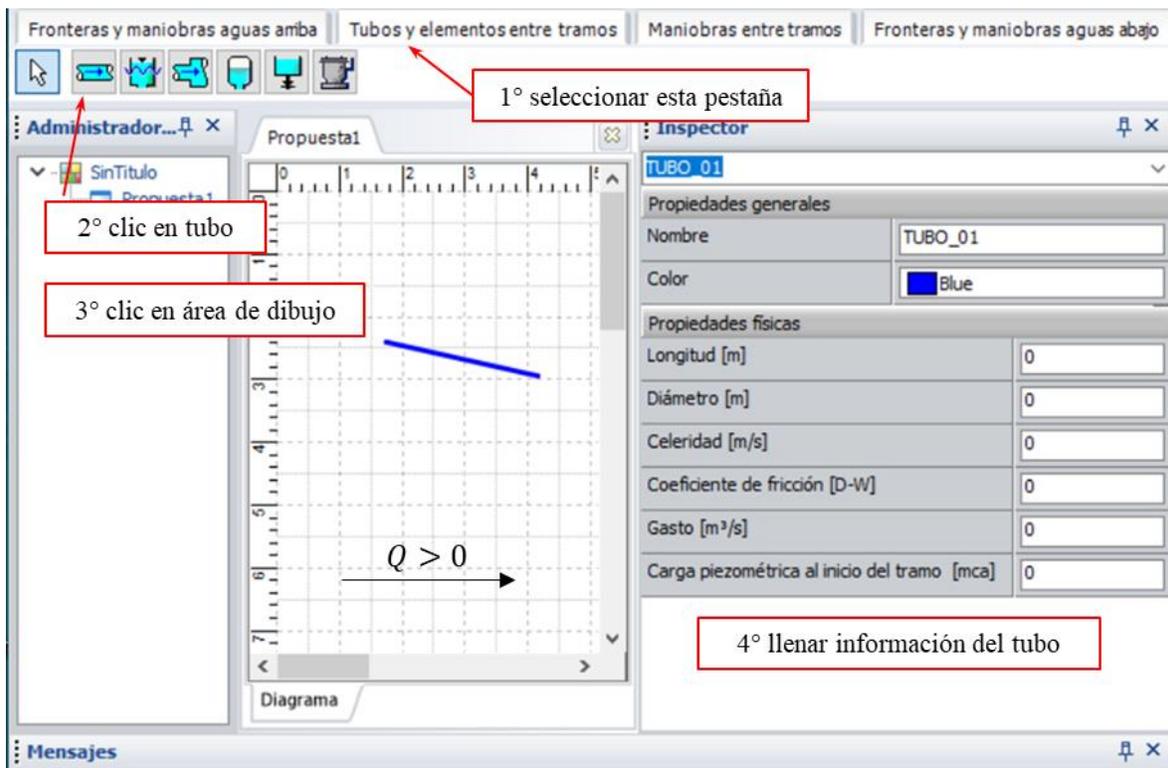


Figura 4.2 Una manera dar de alta tramos de la conducción

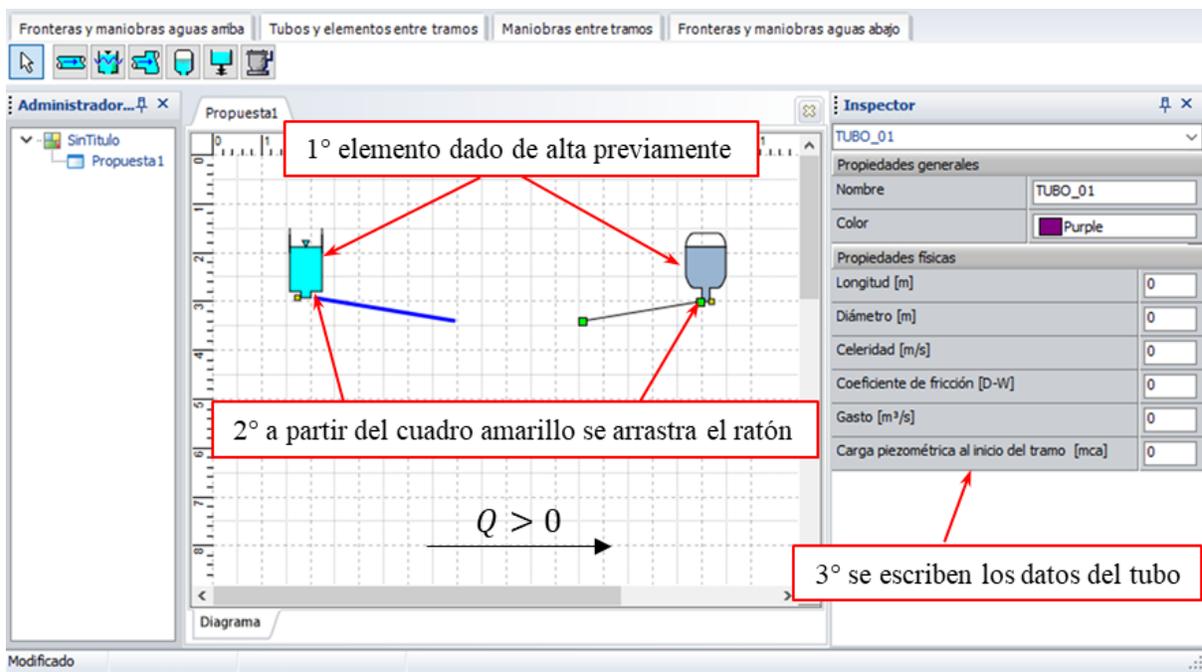


Figura 4.3 Otra forma de dar de alta tramos de la conducción

A través del Inspector se indican las propiedades de la tubería.

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica al tramo.
- ❖ Color, opcional, para distinguir visualmente los tramos se puede elegir su color.

Propiedades físicas:

- ❖ Longitud [m], la longitud mínima que se acepta es de 2 m. Considerando que el principal objetivo de TransDocencia es didáctico, se recomienda trabajar con tuberías de longitud mayores o iguales que 100 m para evitar archivos de resultados muy grandes, principalmente el de la onda de presión.
- ❖ Diámetro [m], el diámetro mínimo permitido es de 0.0508 m (2").
- ❖ Celeridad [m/s], su valor puede determinarse a través de la Ecuación A2.1, el intervalo permitido es $100 < a < 1530$ m/s.

- ❖ Coeficiente de fricción [D-W], es el factor de fricción de Darcy-Weisbach, puede determinarse a través de la Ecuación A1.2. Su valor debe pertenecer al intervalo $0.008 \leq f \leq 0.07$.
- ❖ Gasto [m^3/s], corresponde al gasto en flujo permanente previo al transitorio.
- ❖ Carga piezométrica al inicio del tramo [m], cuando no hay flujo en el tramo, como es el caso en el que hay una válvula cerrada, debe indicarse la carga en la frontera aguas arriba del tramo (extremo izquierdo del tubo).

4.2 Cambio de tubería o unión de tramos

Una conducción puede estar formada por tramos de diferentes características, para representar la unión de ellos se sigue la secuencia que se muestra en la Figura 4.4. En este caso la información que se pide en el Inspector es opcional.

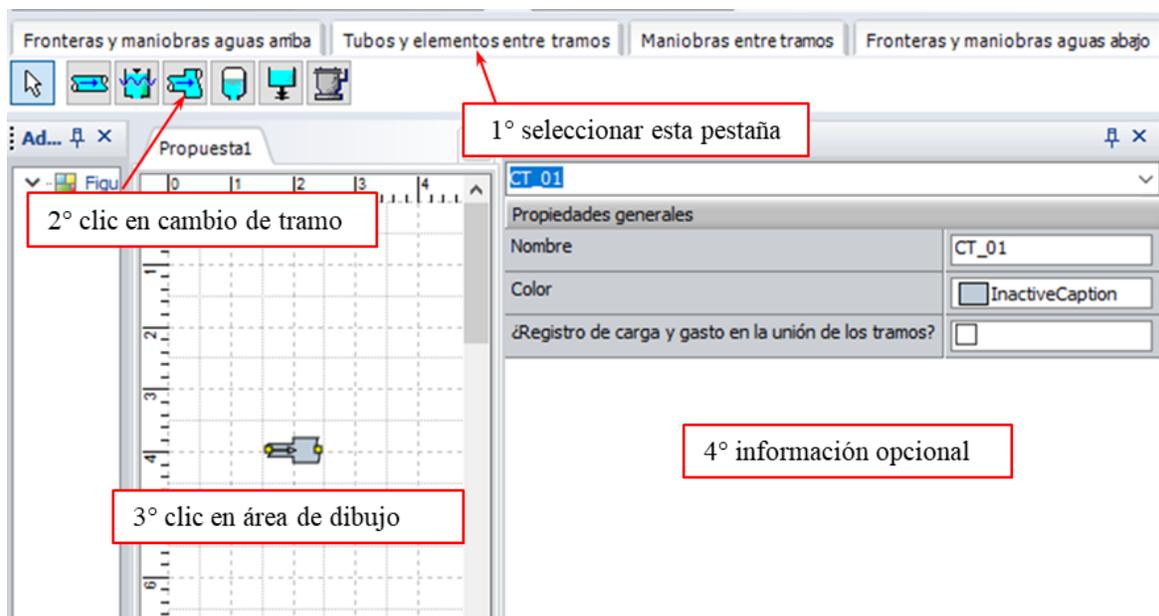


Figura 4.4 Cambio de tramo o unión de tuberías

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, es útil escribir como referencia la ubicación.
- ❖ Color, opcional, sirve para distinguir visualmente.
- ❖ ¿Registro de carga y gasto en la unión de los tramos? Opcional, al palomear la casilla se graban la carga y el gasto.

Al terminar una simulación, en el archivo de cargas se graba, en mca, la carga inmediatamente aguas arriba de la unión de los tramos (no se consideran las pérdidas de carga que introduce la unión) y en el de gastos, en m^3/s , el gasto que pasa por la unión, ambas variables en función del tiempo, en s.

4.3 Tanque en la frontera aguas arriba

En general, durante el intervalo de tiempo en el que se desarrolla un flujo transitorio rápido la elevación de la superficie libre del agua (SLA) en los suministros, tales como presas, embalses, tanques, etc., se puede considerar constante. Por lo que, la carga en la frontera aguas arriba puede considerarse constante. Otra consideración que se toma en cuenta es que la carga de velocidad a la entrada de la tubería conectada al tanque es muy pequeña comparada con la carga de presión impuesta por la elevación de la SLA en el tanque, por lo que las pérdidas a la entrada de la tubería se desprecian.

En la Figura 4.5 se muestra la secuencia de pasos que debe seguirse para simular una frontera de carga constante y a continuación se indica la información que debe proporcionarse.

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica al tanque o embalse.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarlo.
- ❖ Carga [msnm], carga de presión que impone el tanque o elevación de la superficie libre del agua.

- ❖ Cadenamiento del embalse [m], opcional. Cuando se tiene información de la topografía por donde pasa la tubería del sistema hidráulico, es la ubicación del tanque respecto al origen de las abscisas del perfil topográfico.

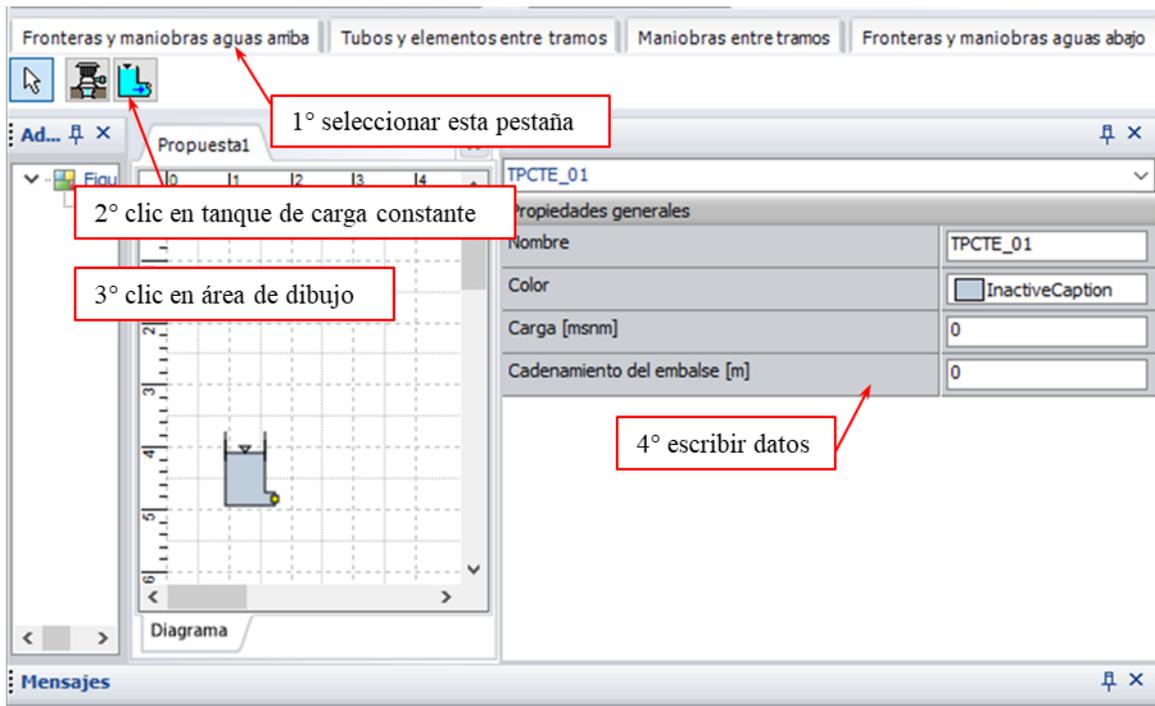


Figura 4.5 Frontera aguas arriba de carga constante

Al terminar una simulación, en el archivo de cargas se graba en mca, la carga inmediatamente aguas abajo del tanque, que en este caso es un valor constante y en el de gastos, en m^3/s , el gasto que entrega el tanque (positivo) o recibe (negativo), ambas variables en función del tiempo, en s.

4.4 Tanque en la frontera aguas abajo

En este caso se considera que, durante el intervalo de tiempo en el que se desarrolla el flujo transitorio rápido la elevación media de la superficie libre del agua (SLA) en los tanques de descarga tiene pequeñas variaciones, por lo que, la carga en la frontera aguas abajo se considera constante. Una consideración adicional que se toma en cuenta es que la carga de

velocidad a la salida de la tubería que llega al tanque es muy pequeña comparada con la carga de presión impuesta por la elevación de la SLA en el tanque, por lo que las pérdidas a la salida de la tubería se desprecian.

En la Figura 4.6 se muestra la secuencia de pasos que debe seguirse para simular una frontera de carga constante en el extremo aguas abajo de la conducción y a continuación, se indica la información que debe proporcionarse.

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica al tanque o embalse.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarlo.

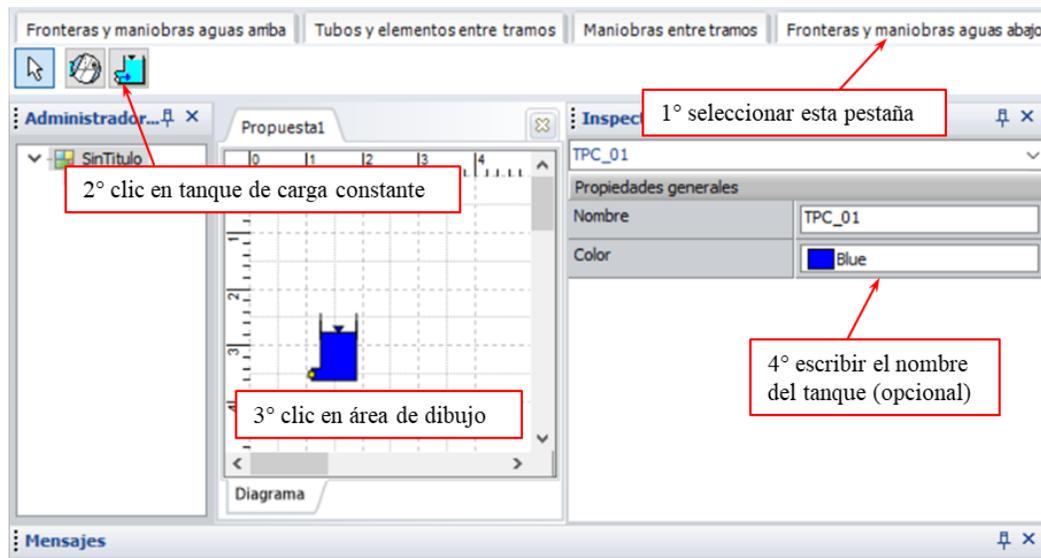


Figura 4.6 Frontera aguas abajo de carga constante

La carga de presión en el tanque aguas abajo (tanque de entrega o tanque de descarga), se determina con la ecuación de la energía a partir de la condición de operación en la frontera aguas arriba, el gasto en flujo permanente y las características de la conducción.

Al terminar una simulación, se graba en el archivo de cargas en mca, la carga en la sección inmediatamente aguas arriba del tanque, que en este caso es un valor constante. En el archivo de gastos, en m^3/s , el gasto que recibe el tanque (positivo) o que entrega a la conducción (negativo), ambas variables en función del tiempo, en s.

4.5 Torre o tanque de oscilación

Las torres o tanques de oscilación son tanques abiertos en su parte superior que se conectan a la línea de conducción a través de una tubería cuya longitud depende del trazo de la conducción y el sitio de ubicación de la torre. En la Figura 4.7 se muestra una de las torres de oscilación del acueducto Río Colorado – Tijuana, Baja California, México.

Mientras la conducción opera en flujo permanente, la elevación de la SLA en la torre de oscilación presenta pequeñas fluctuaciones alrededor de un valor medio constante establecido por la carga piezométrica en la sección de la conducción en donde está conectada la torre, para evitar que el agua se derrame por el coronamiento de la torre, la cota de elevación de la corona debe ser mayor que esa carga piezométrica. Durante la operación en flujo permanente, no hay flujo en la línea que conecta al tanque con la conducción.



Figura 4.7 Torre de oscilación, acueducto Río Colorado Tijuana, Baja California, México. Cortesía de Alejandro Sánchez Huerta

Cuando se suspende el bombeo en un sistema de bombeo, la presión en el interior de la conducción disminuye, en el momento en que la carga piezométrica disminuye en la sección de la conducción en donde está conectada la torre, se presenta una diferencia de cargas entre la elevación del agua en la torre y la piezométrica en la conducción, como resultado, se establece un flujo en dirección de la torre hacia la conducción que limita la disminución de presión en la conducción. En presencia de una sobrepresión en la tubería, al ser mayor la carga en la conducción que en la torre se establece un flujo de la conducción hacia la torre, el ingreso de agua en la torre evita que la presión en la tubería siga aumentando.

Las torres de oscilación modifican el comportamiento del fenómeno transitorio en la conducción, de tal forma que las mayores variaciones de presión quedan confinadas en el tramo de la conducción limitado por el sitio en donde se presentó el evento que produjo el transitorio y el sitio en donde se interconecta la torre con la conducción. En el resto de la conducción, la amplitud de la variación de la presión tiene valores significativamente menores. Esto se debe a que durante un transitorio por golpe de ariete las torres operan como un reflector de las ondas de presión, ver Figura 4.8.

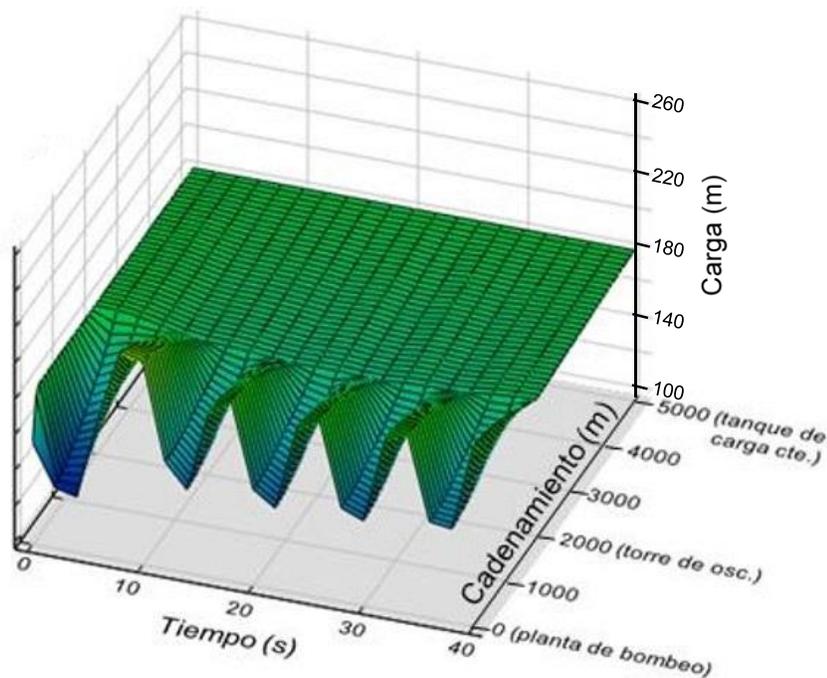


Figura 4.8 Transitorio producido por el paro súbito del bombeo. Las máximas variaciones de presión permanecen entre la planta de bombeo y la torre de oscilación. Cortesía de Libia Carmona

En la Figura 4.9 se muestran dos torres de oscilación del acueducto Linares Monterrey, Nuevo León, México, a las torres localizadas aguas arriba de las plantas de bombeo de les llame torre de sumergencia.



Figura 4.9 Torres de oscilación, una ubicada aguas arriba de la planta de bombeo (torre de sumergencia) y la otra aguas abajo. Acueducto Linares-Monterrey, Nuevo León, México. Cortesía de Rafael Carmona Paredes

En la Figura 4.10 se muestra la secuencia de pasos que debe seguirse para simular una torre de oscilación y a continuación, se indica la información que debe proporcionarse.

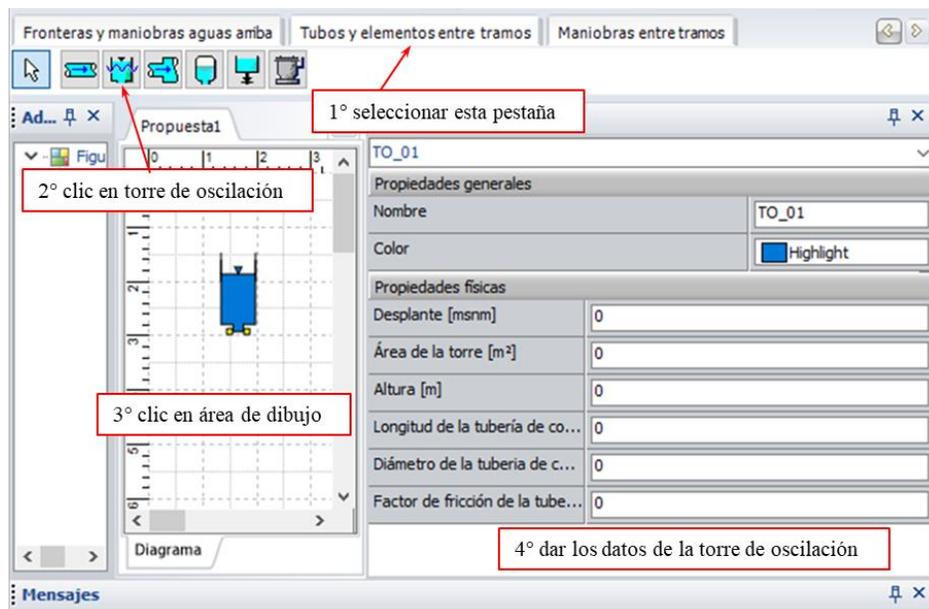


Figura 4.10 Pantalla para dar de alta una torre de oscilación

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la torre de oscilación
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarlo.

Propiedades físicas:

- ❖ Desplante [msnm], se obtiene de los datos topográficos y la ubicación de la torre. Se recomienda que las torres de oscilación se ubiquen en zonas altas de la topografía para que la altura de la torre sea menor que si se construyera en sitios bajos.
- ❖ Área de la torre [m²], es el área de la sección transversal de la torre. Para proponer un valor preliminar ver Ejemplo 2, Ejemplo 3 o Sección A5.2.
- ❖ Altura [m], la altura debe ser mayor que la resta de la carga piezométrica en flujo permanente en el sitio en donde se interconecta la torre con la conducción menos la cota de desplante de su plantilla, para proponer un valor preliminar consultar Ejemplo 2 y Ejemplo 3. Las dimensiones óptimas de la torre se obtienen a través de analizar resultados de simulaciones realizadas con diferentes áreas y alturas.
- ❖ Longitud de la tubería de conexión torre-conducción [m], (ver Figura A5.1) la determinan el trazo del acueducto y la ubicación de la torre. Este valor puede ser igual a cero, en ese caso la simulación del transitorio se realiza considerando que no existe esa tubería.
- ❖ Diámetro de la tubería de conexión torre-conducción [m], (ver Figura A5.1) en las primeras simulaciones puede considerarse igual al diámetro de la conducción. En sistemas de bombeo se recomienda que la velocidad del flujo en las tuberías de conexión entre las torres de oscilación y la línea de conducción esté en el intervalo [1.5, 4] m/s. La velocidad del flujo puede estimarse a partir del gasto que entrega la torre obtenido en una simulación realizada sin considerar la tubería de conexión. Se acepta el diámetro igual a cero, en ese caso la simulación del transitorio se realiza considerando que no existe esa tubería.

- ❖ Factor de fricción de la tubería de conexión [D-W], en las primeras simulaciones puede considerarse igual al de la conducción. Se acepta igual a cero, en ese caso la simulación del transitorio se realiza considerando que no existe esa tubería.

Al final de la simulación, en el archivo de cargas se graba la carga en la interconexión de la conducción con la línea que llega a la torre, en mca. En el de gastos, el gasto que la torre aporta a la conducción (positivo) o recibe de la conducción (negativo), en m^3/s . En el archivo de niveles en los tanques, se graba la elevación de la SLA en msnm, todas las variables están en función del tiempo, en s.

4.6 Cámara de aire

Las cámaras de aire son tanques a presión que contienen en su parte inferior agua y en la superior un gas, comúnmente aire comprimido para almacenamiento de la energía que permite reducir las fluctuaciones de presión transitorias producidas por el disparo de equipos de bombeo en sistemas de bombeo. Durante la operación en flujo permanente, la piezométrica de trabajo pasa por arriba de la cámara como se muestra en la Figura 4.11.

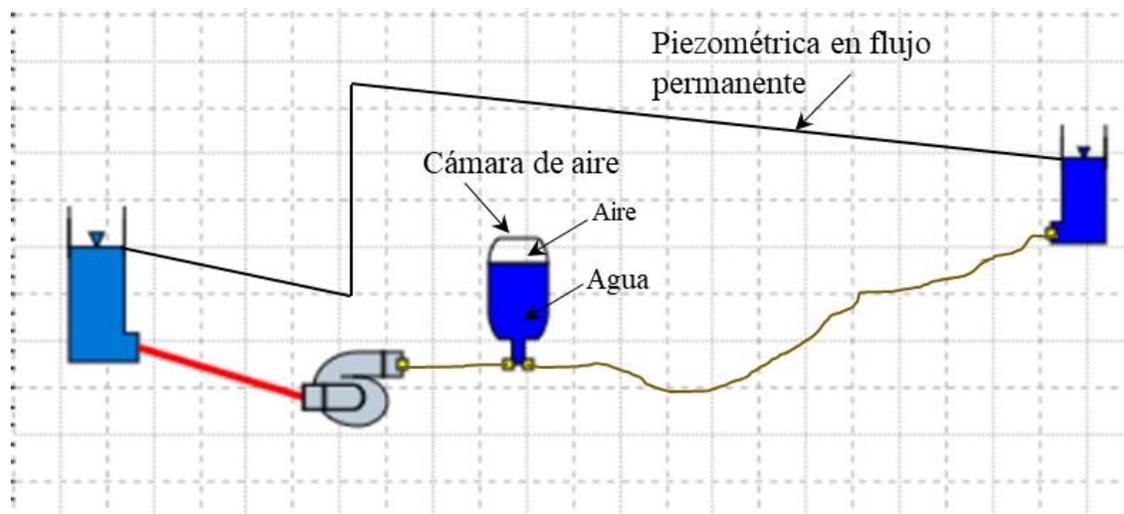


Figura 4.11 En flujo permanente la piezométrica de trabajo pasa por arriba de la cámara

Cuando uno o todos los equipos de bombeo de una planta dejan de operar baja la presión en el sitio de conexión de la cámara con la conducción, en la cámara, el aire comprimido se expande y expulsa el agua hacia la conducción. Comúnmente el sistema de bombeo entrega el agua en un tanque, durante el tiempo en el que se desarrolla un transitorio de golpe de ariete puede considerarse que la carga en el tanque de entrega no cambia considerablemente, lo que impone en el extremo aguas abajo de la conducción una sección con carga constante. La onda de baja presión producida por la suspensión del bombeo recorre toda la conducción y se refleja en este tanque, conforme la onda de presión reflejada en el tanque recorre la conducción en dirección aguas arriba va aumentando la presión en toda la conducción.

Debido a los cambios de presión que se presentan durante el transitorio, en algún momento la presión en la tubería será mayor que la presión en el interior de la cámara, como resultado habrá un flujo de agua de la conducción hacia la cámara de aire, el aire se comprime pudiendo alcanzar presiones suficientemente altas para volver a empujar el agua contenida en la cámara hacia la línea principal. El aire se comprime y se expande como consecuencia del viaje de ida y vuelta de la onda de presión entre los extremos de la conducción hasta que se disipa la energía y se alcanza una condición de equilibrio de cargas en toda la tubería.

En ocasiones, la conexión de las cámaras de aire con la conducción se realiza a través de arreglos que contienen orificios diferenciales que introducen pérdidas de carga mayores para el flujo que se dirige de la conducción hacia la cámara que para el flujo que va de la cámara hacia la conducción y válvulas de seccionamiento necesarias para realizar mantenimiento y reparaciones en las cámaras, como se muestra en la Figura 4.12.

Las cámaras de aire protegen adecuadamente a la tubería cuando contienen el volumen de aire determinado en su diseño. Una medida indirecta del volumen de aire se realiza a través de la elevación de la interface aire-agua (Figura 4.15), mismo que se mide con las mirillas (Figura 4.13) que se instalan a lo largo de la cámara y que permiten registrar la altura de la interfaz agua-aire en el interior de la cámara. El volumen de aire no puede medirse con manómetros que registren la presión en el interior de la cámara puesto que la presión queda establecida por las condiciones del flujo en la tubería principal.

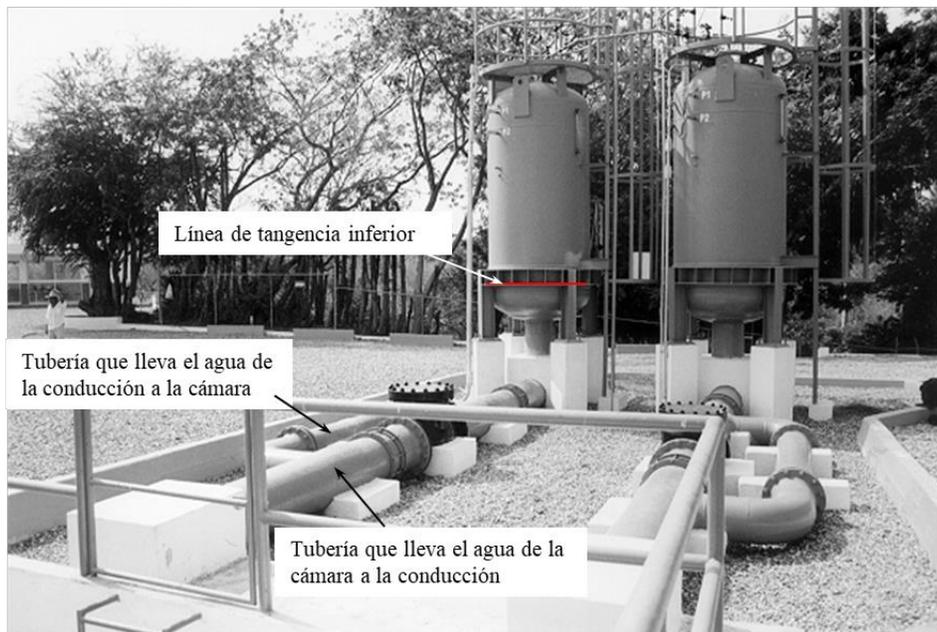


Figura 4.12 Cámaras de aire del acueducto Papagayo II, Acapulco Gro. México. Cortesía de Alejandro Sánchez Huerta



Figura 4.13 El nivel del agua en la cámara se revisa a través de una mirilla. Cámara de aire en el acueducto González Ortega II - Ucum II - Chetumal. Cortesía de Alejandro Sánchez Huerta

El aire de las cámaras no se pierde cuando operan para controlar un transitorio, sólo se pierde por fugas a través de conexiones mal realizadas y, muy lentamente, por mezcla con el agua del interior de la cámara. De esta manera, la capacidad de los compresores necesarios para mantener el volumen de aire especificado en el diseño sólo tomará en cuenta esas pequeñas pérdidas, mientras que, para el llenado de las cámaras por primera vez, o después de un mantenimiento o reparación que haya requerido su vaciado, podrán usarse compresores grandes que no requieren instalación permanente junto a las cámaras.

Un nivel de agua por arriba del indicado, significa falta de aire; el cual debe inyectarse con el compresor. Cuando el nivel del agua esté por debajo de la referencia determinada en su diseño se tendrá exceso de aire que deberá ser expulsado a través de una válvula de purga especialmente instalada para ese propósito, con el fin de evitar que éste ingrese a la conducción durante la operación de la cámara.

En la Figura 4.14 se muestra la secuencia de pasos que debe seguirse para simular una cámara de aire y a continuación, se indica la información que debe proporcionarse.

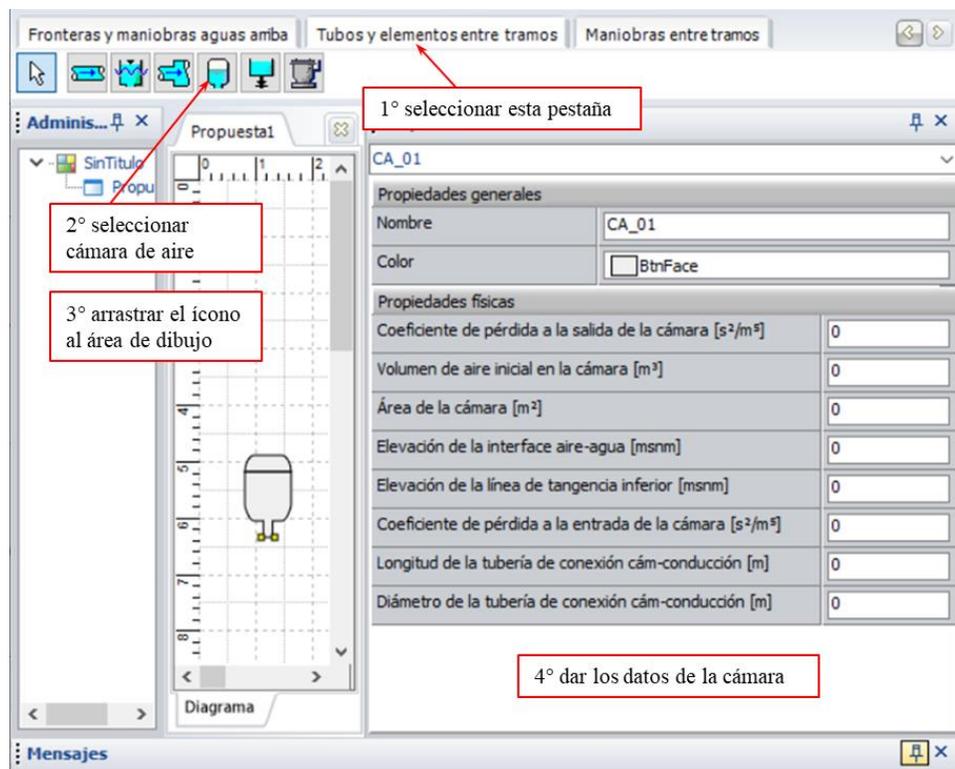


Figura 4.14 Pasos para dar de alta cámaras de aire

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la cámara de aire.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarla.

Propiedades físicas:

- ❖ Coeficiente de pérdida a la salida de la cámara [s^2/m^5], es el coeficiente de pérdida K_s en s^2/m^5 que multiplica al cuadrado del gasto ($\Delta h = K_s Q^2$) que en ocasiones se introduce en la línea que lleva el agua de la cámara hacia la conducción (Figura 4.12 y Figura 4.15), en la etapa de pre diseño puede considerarse igual a $0.01 s^2/m^5$. Para determinarlo en etapas posteriores ver Anexo A7.
- ❖ Volumen de aire inicial en la cámara [m^3], un volumen preliminar puede determinarse con el procedimiento propuesto en Carmona, P. R., Carmona, P. L. & Zarco, H. J. A. (2002), el cual se presenta en el Anexo A7. Si este volumen es insuficiente para controlar el transitorio deberá duplicarse o triplicarse y realizar nuevas simulaciones.
- ❖ Área de la cámara [m^2], es el área transversal de la cámara, ver Anexo A7.
- ❖ Elevación de la interface aire-agua [msnm], es la elevación de la superficie libre del agua, ver Figura 4.15.
- ❖ Elevación línea de tangencia inferior [msnm], es la elevación de la sección inferior del cilindro de la cámara. Se determina a partir de la elevación del terreno del sitio en donde se instalará la cámara y de la altura de la tapa inferior, la cual depende de su geometría. La altura de tapas hemisféricas es igual al radio del cilindro de la cámara, ver Figuras 4.12 y 4.15.
- ❖ Coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara [s^2/m^5], es el coeficiente de pérdida K_e en s^2/m^5 que multiplica al cuadrado del gasto ($\Delta h = K_e Q^2$) que en ocasiones se introduce en la línea que lleva el agua de la conducción hacia la cámara (Figura 4.12 y Figura 4.15). En la etapa de pre diseño puede considerarse igual a $0.01 s^2/m^5$. Para determinarlo en etapas posteriores revisar el ver Anexo A7.
- ❖ Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m], ésta depende del sitio en donde se construirá la cámara (Figura 4.12 y Figura 4.15) en etapas de pre

diseño puede considerarse de unos cinco metros, la longitud definitiva depende de la ubicación de la cámara.

- ❖ Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m], en etapas de pre diseño puede considerarse igual a la de la conducción en el sitio en donde se conecta la cámara de aire, Figura 4.12 y Figura 4.15.

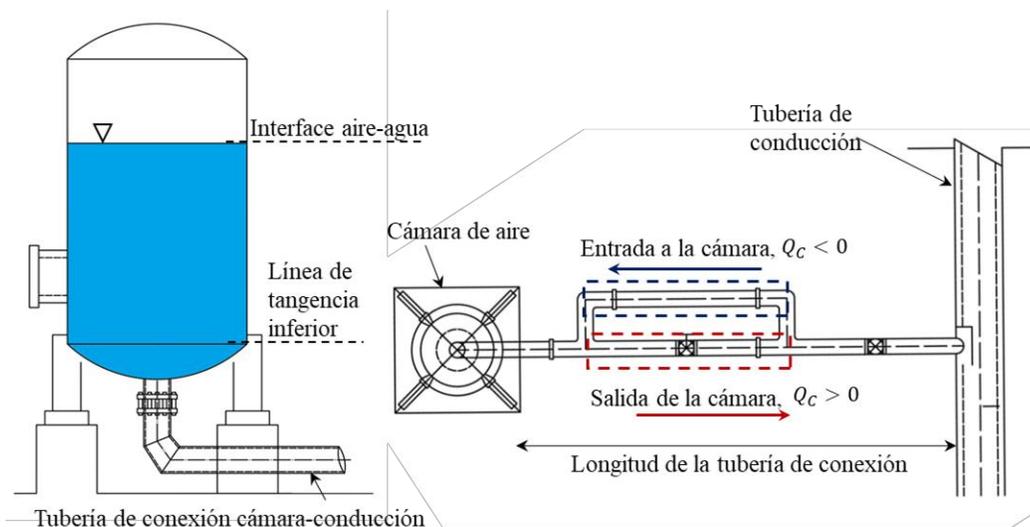


Figura 4.15 Durante la operación de la cámara, se recomienda que el nivel del agua siempre esté por arriba de la línea de tangencia inferior para evitar ingreso de aire a la conducción

Al terminar una simulación, en el archivo de cargas se graba, en mca, la carga en la conexión de la cámara con la línea de conducción; en el de gastos, en m^3/s , el gasto de agua que se intercambia entre la cámara y la conducción, positivo cuando la cámara entrega agua a la conducción y negativo cuando el agua regresa a la cámara; en el archivo de niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire, se graba, en msnm, la elevación de la SLA en la cámara, todas las variables están en función del tiempo, en s.

En la Figura 4.16 se muestran fotografías de cámaras de aire construidas en diversos acueductos del país, se observa la diferencia del tamaño que hay entre ellas. Esto se debe a que cada sistema de conducción de agua requiere de un esquema particular de protección ante transitorios hidráulicos.



Figura 4.16 El tamaño y número de las cámaras de aire depende de las características de cada sistema de bombeo. Cortesía de Rafael Carmona, Eduardo Rodal y Alejandro Sánchez

4.7 Tanque unidireccional

Un tanque unidireccional es una estructura que se utiliza para limitar las depresiones durante un transitorio, a diferencia de las torres de oscilación y las cámaras de aire que tienen la capacidad de proteger la conducción de sobrepresiones y depresiones. El tanque unidireccional es un tanque abierto en su parte superior, se conecta a la conducción a través de una tubería en la que se instalan, por un lado, válvulas de retención (no retorno o check) y por otro, válvulas que permiten el llenado del tanque después haber operado. El sentido correcto de la instalación de las válvulas de retención es el que impide que durante la operación en flujo permanente el agua fluya de la conducción hacia el tanque unidireccional, de tal forma que el nivel del agua en el tanque puede estar por debajo de la piezométrica en flujo permanente del sitio en donde se conecta el tanque con la conducción, Figura 4.17.

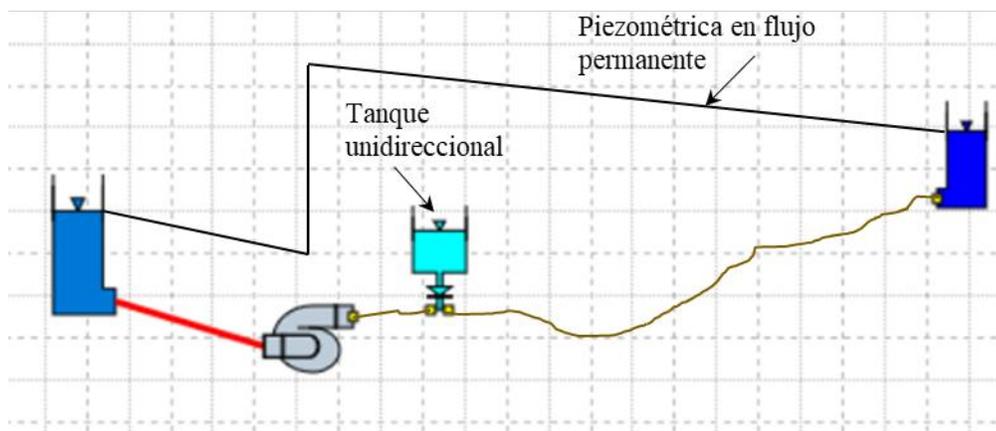


Figura 4.17 La altura de tanques unidireccionales puede ser menor que la piezométrica que se establece en flujo permanente

Los tanques unidireccionales operan cuando la carga piezométrica de la conducción en el sitio en donde está conectado es menor que la elevación del agua en el tanque. Cuando la situación anterior se presenta, las válvulas de retención se abren y el agua contenida en el tanque fluye hacia la conducción, un tanque con las dimensiones y ubicación adecuadas, puede evitar que se presenten depresiones en la conducción.

Una vez que el tanque ha operado, el nivel del agua debe recuperarse para que el tanque esté listo para volver a operar en cualquier momento, para ello se instalan las válvulas de llenado. Éstas trabajan mecánicamente a través de un flotador o con un presóstato fijado a la pared del tanque que abre la válvula cuando la presión en la pared está por debajo de la correspondiente a la de tanque lleno. Cuando el nivel del agua en el tanque ha bajado hasta el programado para abrir las válvulas de llenado y la carga de presión en la conducción es mayor que ese nivel, se crea un flujo de agua de la línea de conducción hacia el tanque que volverá a llenarlo. En la Figura 4.18 se muestra un tanque unidireccional con su arreglo de válvulas y la línea que lo conecta con la conducción principal. En la Figura 4.19 se muestra el arreglo de válvulas de uno de los tanques unidireccionales del acueducto Linares Monterrey.

En la Figura 4.20 se muestra la secuencia de pasos que debe seguirse para simular un tanque unidireccional y más adelante se indica la información que debe proporcionarse.



Figura 4.18 Tanque unidireccional y el arreglo de válvulas para conectarlo a la línea principal del acueducto Chapala-Guadalajara, Jal., México. Cortesía de Rafael Carmona



Figura 4.19 Arreglo de válvulas de uno de los tanques unidireccionales del acueducto Linares Monterrey. Cortesía de Rafael Carmona

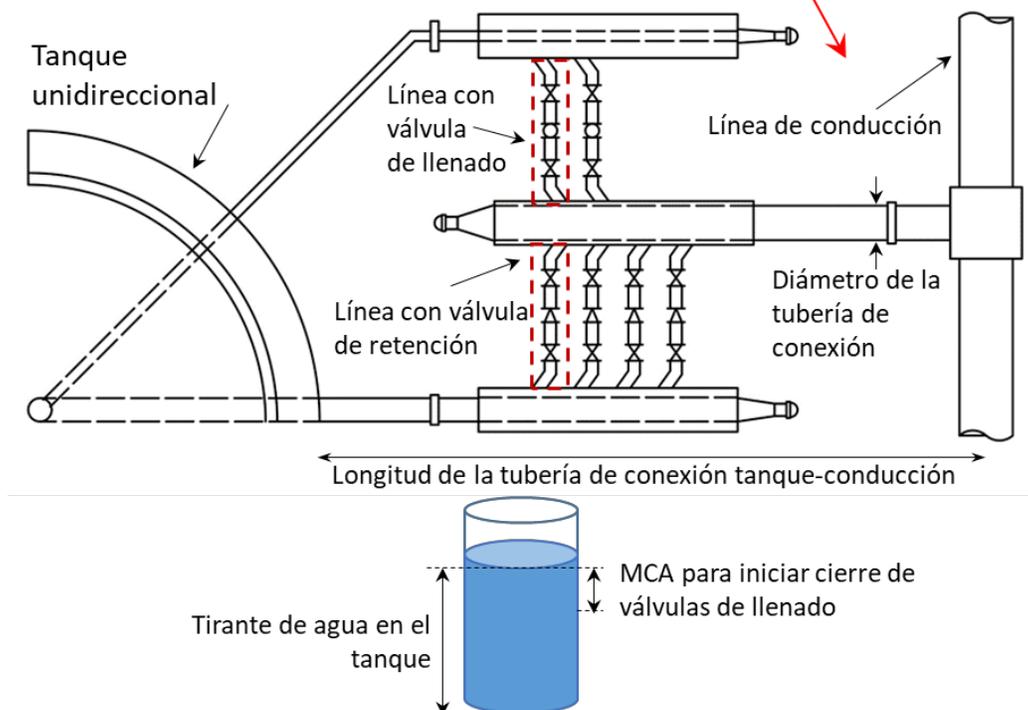
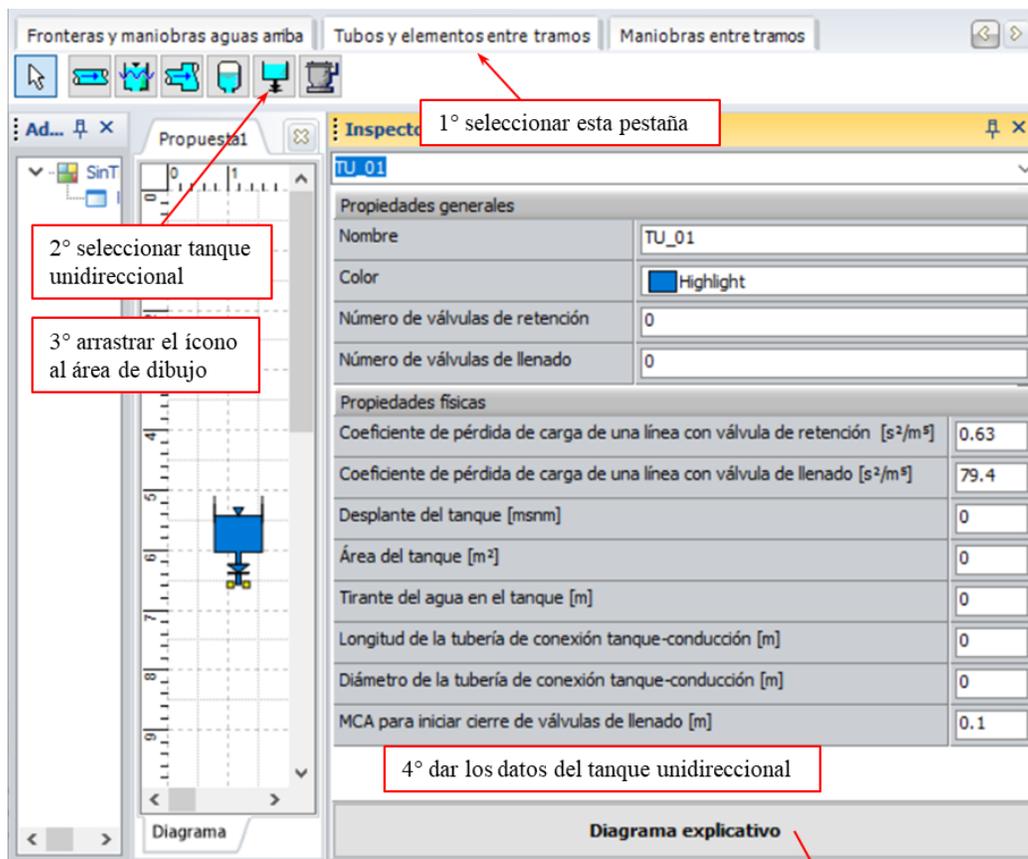


Figura 4.20 Pasos para dar de alta tanques unidireccionales

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica al tanque unidireccional.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarla.
- ❖ Número de válvulas de retención, también llamadas de no retorno o check. En la Figura 4.19 se observa que puede haber más de una, en la etapa de predimensionamiento puede considerarse una sola válvula.
- ❖ Número de válvulas de llenado, en la Figura 4.19 se observa que puede haber más de una, en la etapa de predimensionamiento puede considerarse una sola válvula.

Propiedades físicas:

- ❖ Coeficiente de pérdida de carga de una línea con válvula de retención [s^2/m^5], coeficiente que multiplica el cuadrado del gasto ($\Delta h = K_v Q^2$). Se ha propuesto $0.63 s^2/m^5$, pero puede modificarse.
- ❖ Coeficiente de pérdida de carga de una línea con válvula de llenado [s^2/m^5], coeficiente que multiplica el cuadrado del gasto ($\Delta h = K_v Q^2$). Se ha propuesto $79.4 s^2/m^5$, pero puede modificarse.
- ❖ Desplante del tanque [msnm], lo determina la topografía del sitio en donde se construirá el tanque. Se recomienda que los tanques unidireccionales se ubiquen en zonas altas de la topografía.
- ❖ Área del tanque [m^2], es el área de la sección transversal. Un valor preliminar puede calcularse como se indica en la Sección A6.2.
- ❖ Tirante del agua en el tanque [m]. Para que un tanque unidireccional opere durante un transitorio, la elevación de la SLA debe ser mayor, en algún momento del transitorio, que la carga piezométrica transitoria en el sitio en donde se conecta el tanque con la conducción. La elevación de la SLA es la suma de la elevación de desplante del tanque más el tirante de agua. A partir de esta condición puede proponerse un valor para el tirante de agua en el tanque.

- ❖ Longitud de la tubería de conexión tanque-conducción [m], (ver Figura 4.18) la determina el sitio en donde se construirá, cuando aún no se ha determinado puede considerarse de 15 m.
- ❖ Diámetro de la tubería de conexión tanque-conducción [m], (ver Figura 4.18) en la etapa de predimensionamiento puede considerarse igual al diámetro de la conducción. En sistemas de bombeo se recomienda que la velocidad del flujo en las tuberías de conexión entre los tanques unidireccionales y la línea de conducción sea menor que 4 m/s.
- ❖ MCA para iniciar cierre de válvulas de llenado [m]. Las válvulas de llenado comienzan a cerrarse cuando el nivel del agua en el tanque está a una distancia MCA de la elevación de la SLA que tenía antes de comenzar a operar el tanque, ver diagrama explicativo de la Figura 4.20.

Al final de la simulación se graba en el archivo de cargas, en mca, la carga en el sitio de positivo conexión del tanque con la conducción; en el de gastos, el gasto de agua, en m^3/s , que entrega el tanque () o recibe (negativo); en el archivo de niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire, se graba, en msnm, la elevación de la SLA en el tanque y el volumen de agua acumulado que ha entregado, en m^3 , todas las variables en función del tiempo, en s.

4.8 Válvula de admisión y expulsión de aire

A través de las válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA) o válvulas rompedoras de vacío se crea una conexión entre la atmósfera y el interior de la conducción para evitar depresiones. Cuando la presión en el interior de la tubería alcanza un valor determinado por los operadores del sistema se abre la válvula para que ingrese aire, en ese momento se establece la presión atmosférica en el interior de la tubería.

El flujo de aire que ingresa a la tubería es función del diámetro de la válvula y la presión de calibración determinada por el operador a la que ésta abrirá, es decir, de la

diferencia de presión entre la atmósfera y el interior de la tubería al momento de abrir la válvula. En la Figura 4.21 se muestra una VAEA.

En el sistema TransDocencia no se simula la expulsión del aire, una vez que ingresa a la tubería se considera como una masa de aire que permanece localizada en el sitio de conexión de la VAEA, el volumen de la masa de aire se modifica en función de los cambios de presión en el interior de la conducción. Cada vez que la válvula opera, la cantidad de aire en la tubería aumenta. A través del gasto o caudal máximo de aire que ingresa se determina el diámetro de la válvula.



Figura 4.21 Válvula de admisión y expulsión de aire en el acueducto El Cuchillo Monterrey. Cortesía de Rafael Carmona

El diámetro de la válvula que permita el gasto de aire necesario para evitar depresiones en el interior de la tubería es función del diámetro de la válvula y la diferencia de presión entre la atmósfera y el interior de la tubería, en el Anexo A8 se presenta cómo se determina.

A continuación, se muestra en la Figura 4.22 la secuencia de pasos que debe seguirse para simular una VAEA y la información que debe proporcionarse.

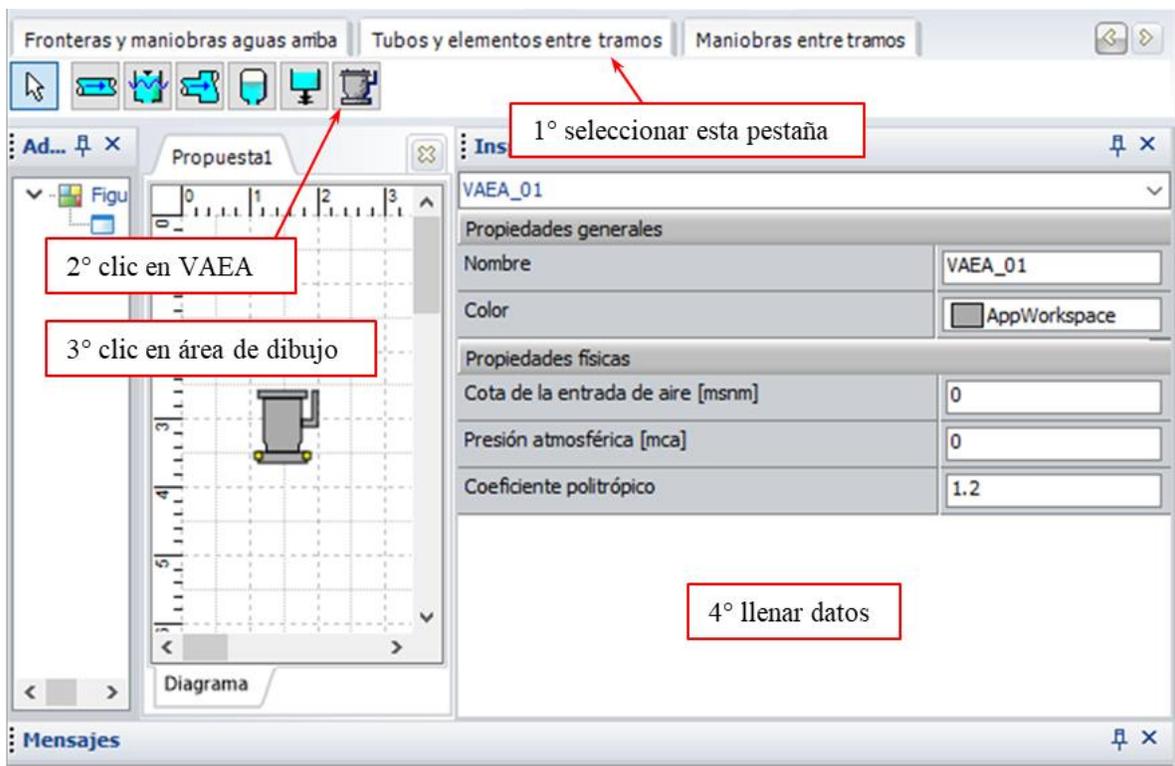


Figura 4.22 Pasos para dar de alta una VAEA

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la VAEA.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarla.

Propiedades físicas:

Para las VAEA, la información que debe proporcionarse no son propiamente características físicas sino información acerca de su operación.

- ❖ Cota de la entrada de aire [msnm], cuando en el sitio en donde se ubica la VAEA la carga piezométrica es igual a la cota de la entrada de aire, inicia el ingreso de aire a la conducción.
- ❖ Presión atmosférica [mca], presión atmosférica en el sitio en donde se localiza la VAEA.
- ❖ Coeficiente politrópico, el valor de este coeficiente se utiliza para simular la compresión y expansión del volumen aire que ingresa a la tubería. Se ha visto, a través de comparar registros tomados en prototipo y simulaciones

numéricas, que un coeficiente politrópico igual a 1.2 es adecuado, sin embargo, éste puede cambiarse.

Durante la simulación, se considera que la masa de aire que entró a la conducción permanece en el sitio en donde está conectada la válvula con la tubería, su volumen varía debido a los cambios de presión en el interior de la tubería. Como consecuencia del viaje de la onda de presión pueden presentarse, en varias ocasiones, depresiones que ocasionen cargas menores que la cota de entrada de aire, cada vez que esto sucediera, la válvula abrirá e ingresará más aire a la conducción aumentando la masa de aire ingresada.

En el archivo de cargas se graba, en mca, la carga en la tubería en el sitio de conexión de la válvula; en el de gastos, en m^3/s , el gasto de aire que ingresa a la conducción. En el archivo de niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire, en m^3 , la dinámica del volumen de aire y la cantidad de aire que ha ingresado. Todas las variables son función del tiempo, en s.

5. Elementos activos, válvulas de movimiento programado y equipos de bombeo

Un flujo transitorio se desarrolla en el intervalo de tiempo en el que un sistema pasa de una condición de operación en flujo estacionario a otra condición de operación de flujo estacionario. En sistemas de bombeo los cambios en la operación se producen de manera programada o súbita, los primeros se realizan para incrementar o disminuir la demanda del gasto de agua y para dar mantenimiento al sistema, los segundos se presentan cuando las bombas dejan de operar súbitamente, comúnmente, como consecuencia de fallas en el suministro de energía eléctrica. Los elementos de los sistemas de bombeo que tienen la capacidad de cambiar la forma de operación son las válvulas y las bombas, en este capítulo se muestra cómo se simulan en el sistema TransDocencia y en el Anexo A9 y Anexo A10 se presentan los modelos matemáticos que los representan.

5.1 Válvulas de movimiento programado o controlado

La operación de las válvulas de movimiento programado o controlado no depende del flujo. El estado de apertura es independiente del flujo, su cierre y apertura se operan manualmente o por medio de un motor, el tiempo en que se realizan las maniobras es programable.

La pérdida de carga que producen las válvulas depende de la posición o porcentaje de apertura del elemento que interfiere con el flujo con respecto al eje de la tubería, como se muestra en la Figura 5.1.

En sistemas de bombeo, se instalan en puntos de la conducción en donde se necesite controlar el flujo y en la descarga de algunas bombas de eje horizontal, tal es el caso del acueducto Linares-Monterrey (Figura 5.1 y Figura 5.2).

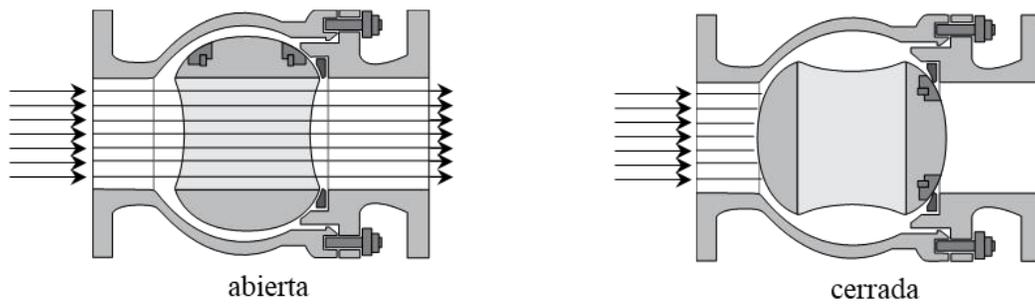
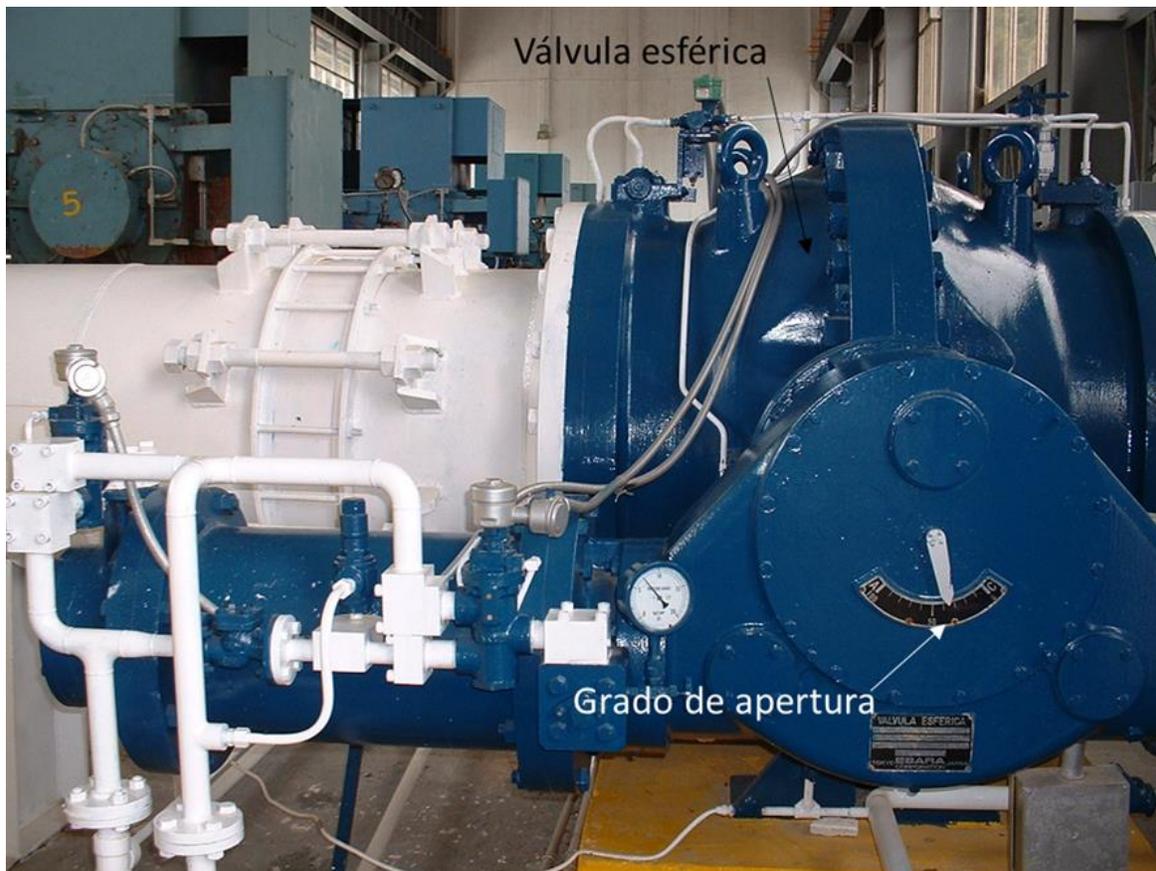


Figura 5.1 Válvula esférica, el flujo que la atraviesa depende de su grado de apertura. Fotografía, cortesía de Eduardo Rodal

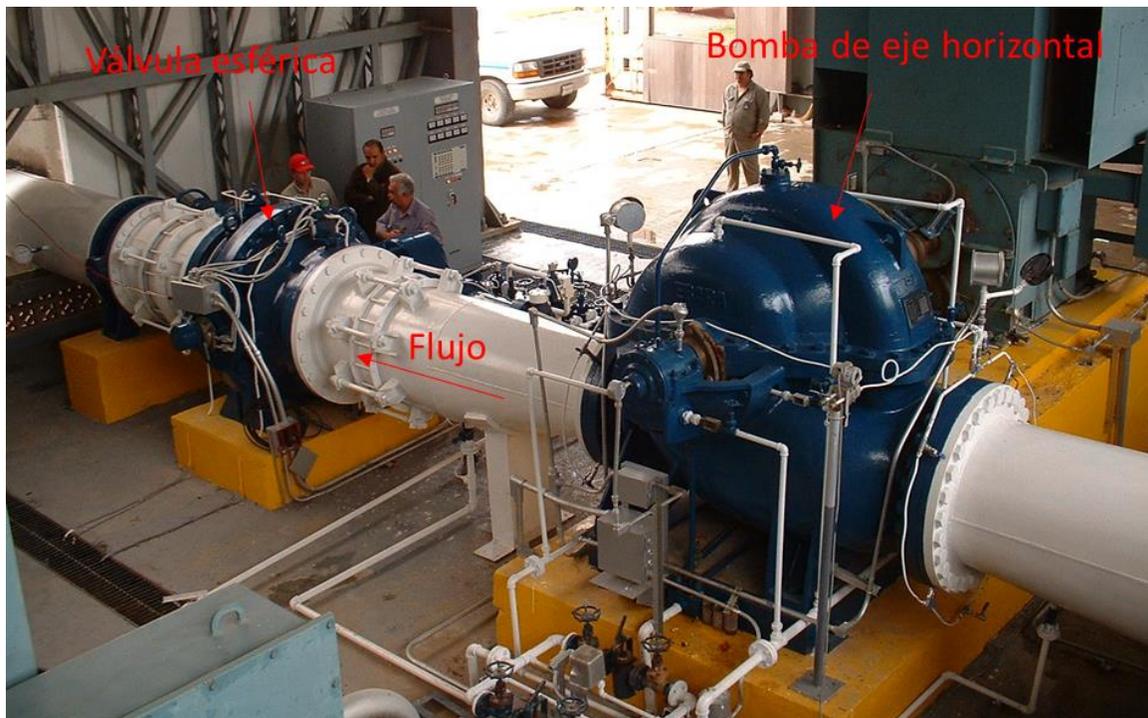


Figura 5.2 Válvula esférica, en la descarga de una bomba de eje horizontal en el acueducto Linares-Monterrey, Nuevo León, México. Cortesía de Eduardo Rodal

En conducciones ascendentes (Figura 5.3) cuando las bombas dejan de operar, al cerrar las válvulas en su descarga limitan gradualmente el caudal de agua que retorna hacia las bombas hasta llevarlo a cero con la finalidad de evitar que giren en sentido inverso a altas velocidades.

En el sistema TransDocencia, a las válvulas de movimiento programado o controlado se les llama válvulas de control, su ubicación puede estar en:

1. La válvula se localiza entre dos tramos de la conducción. En este caso, puede simularse el cierre total o la apertura total de la válvula, en flujo estable la válvula puede estar parcialmente abierta, ver Sección 5.1.1.
2. La válvula se localiza en la frontera aguas abajo del sistema. En este caso, únicamente puede simularse el cierre total de la válvula, la apertura en flujo estable puede ser parcial, ver Sección 5.1.2.
3. En la descarga de las bombas. En este caso, el paro súbito de la bomba y la operación de su válvula de descarga se consideran como un único evento, el cual se presenta en la Sección 5.2.



Figura 5.3 Acueducto ascendente. En paros del bombeo, las bombas son protegidas con válvulas que al cerrarse impiden el flujo de agua que retorna hacia las bombas, de tal forma que se evita que éstas giren en sentido inverso a altas velocidades. Tramo de bombeo TS3-PB3-TO3 del Sistema Cutzamala. Cortesía de Rafael Carmona

5.1.1 Válvula de control ubicada entre dos tramos de tubería

En la Figura 5.4 se muestran los pasos a seguir para dar de alta una válvula de control que se localiza entre dos tramos de la conducción.

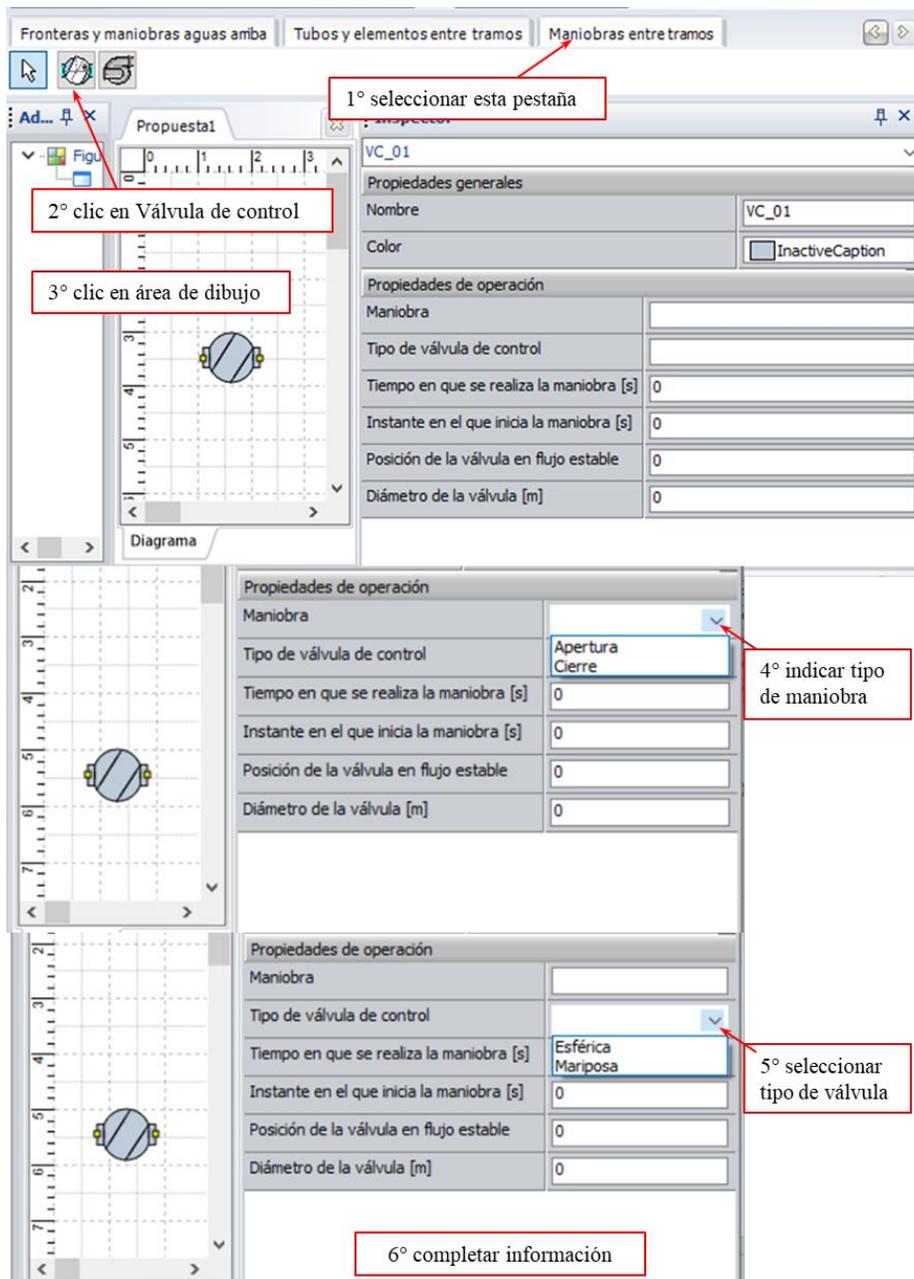


Figura 5.4 Pasos para dar de alta una válvula de control ubicada entre dos tramos de la conducción

A continuación, se indica el significado los campos de datos que se solicitan para simular válvulas de control.

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la válvula.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarla.
- ❖ Maniobra, debe indicarse si se trata de una apertura o cierre.

Propiedades de operación:

- ❖ Tipo de válvula de control, se elige el tipo de válvula, esférica o mariposa (5° paso de la Figura 5.4). La información detallada de las válvulas puede verse seleccionando la pestaña Catálogos y después Curvas de válvulas (Figura 3.4).
- ❖ Tiempo en que se realiza la maniobra [s], es el intervalo de tiempo en el que, la válvula se abre completamente o se cierra completamente (depende del tipo de maniobra indicado) a partir de su posición en flujo estable.
- ❖ Instante en el que inicia la maniobra [s], el movimiento de la válvula puede iniciar en cualquier instante de la simulación. Para simular que la válvula no se abre ni se cierra, basta con indicar que este instante es mayor que el tiempo de simulación.
- ❖ Posición de la válvula en flujo estable, se refiere al grado o porcentaje de apertura de la válvula en flujo permanente. La relación entre el grado de apertura y el coeficiente de pérdida de carga que introducen las válvulas incluidas en TransDocencia se muestran en la Figura 3.6 y la Figura 5.5.
- ❖ Diámetro de la válvula [m], corresponde al diámetro de la sección transversal de la válvula, debe ser acorde al diámetro de la tubería a la que está conectada.

Al final de la simulación en el archivo de cargas se graban, en mca, las cargas aguas arriba y aguas abajo de la válvula, en el de gastos, en m^3/s , el flujo que pasa a través de la válvula en función del tiempo, en s.

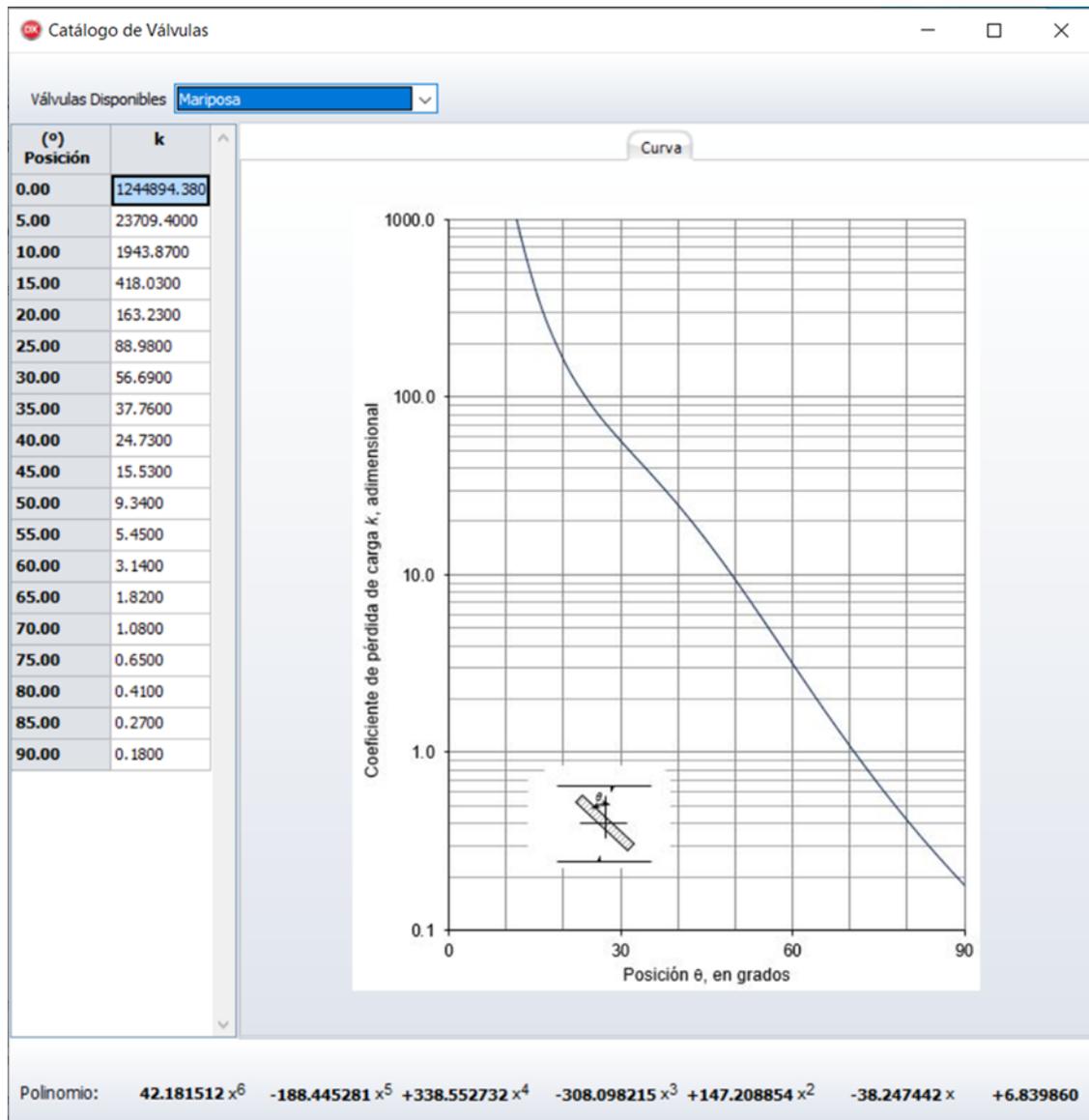


Figura 5.5 Válvula de mariposa, coeficiente de pérdida de carga en función del porcentaje de apertura de la válvula, 90° corresponde a la válvula totalmente abierta

5.1.2 Válvula de control en la frontera aguas abajo

En la Figura 5.6 se muestran los pasos a seguir para simular el cierre de una válvula de control ubicada en la frontera aguas abajo de la conducción.

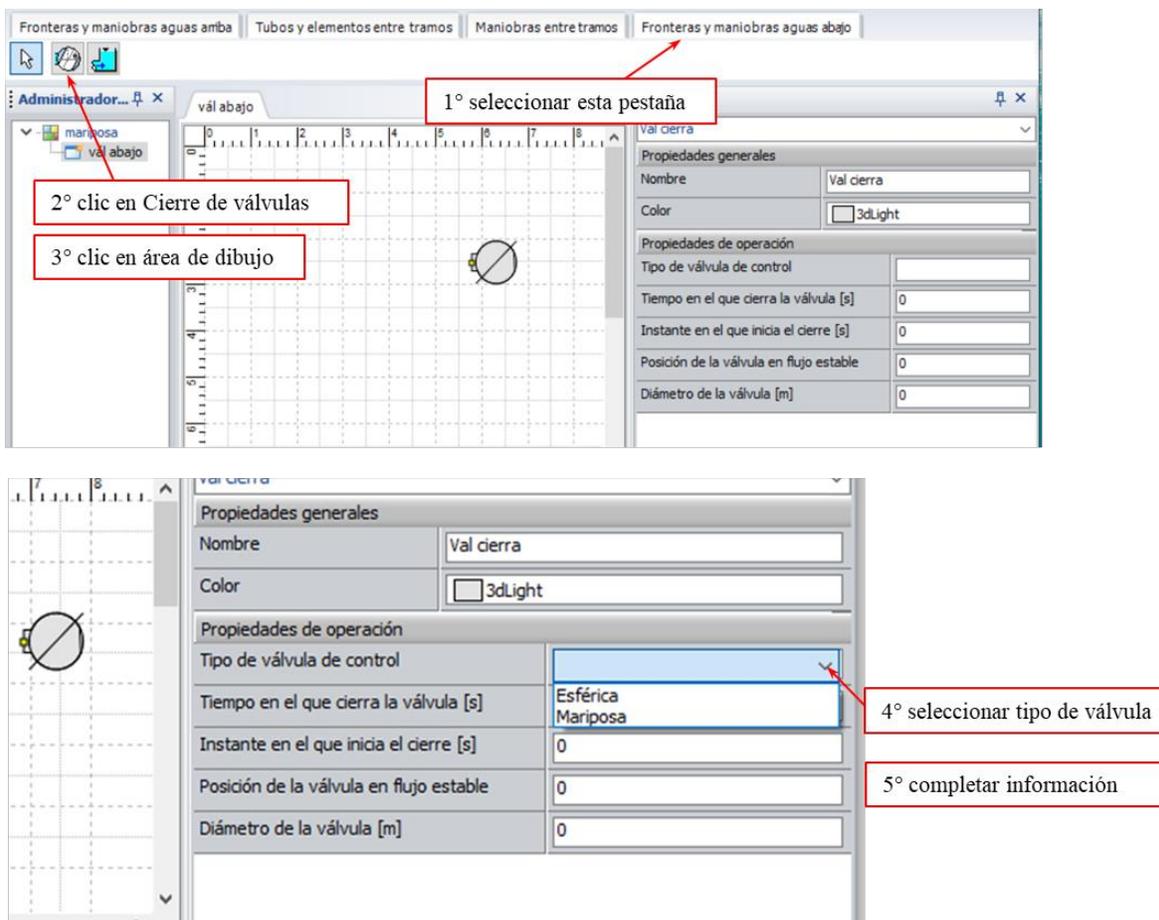


Figura 5.6 Pasos para simular el cierre de una válvula de control ubicada en la frontera aguas abajo

Los datos que deben proporcionarse son los siguientes.

Propiedades generales:

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la válvula.
- ❖ Color, opcional, se puede elegir un color para identificarla.

Propiedades de operación:

- ❖ Tipo de válvula de control, se elige el tipo de válvula, esférica o mariposa (4° paso de la Figura 5.6). La información detallada de las válvulas puede verse seleccionando la pestaña Catálogos y después Curvas de válvulas (Figura 3.4).
- ❖ Tiempo en el que cierra la válvula [s], es el intervalo de tiempo en el que cierra la válvula completamente a partir de su posición en flujo estable.

- ❖ Instante en el que inicia el cierre [s], el movimiento de la válvula puede iniciar en cualquier instante de la simulación. Para simular que la válvula no cierra, basta con indicar que este instante es mayor que el tiempo de simulación.
- ❖ Posición de la válvula en flujo estable, se refiere al grado o porcentaje de apertura de la válvula en flujo permanente. La relación entre el grado de apertura y el coeficiente de pérdida de carga que introducen las válvulas incluidas en TransDocencia se muestran en las Figuras 3.6 y 5.5.
- ❖ Diámetro de la válvula [m], corresponde al diámetro de la sección transversal de la válvula, debe ser acorde al diámetro de la tubería a la que está conectada.

Al final de la simulación en el archivo de cargas se graban, en mca, las cargas aguas arriba y aguas abajo de la válvula, en el de gastos, en m^3/s , el flujo que pasa a través de la válvula en función del tiempo, en s.

5.2 Paro súbito de equipos de bombeo

Las plantas de bombeo pueden localizarse en la frontera aguas arriba del sistema o ubicarse a lo largo de la conducción. En una planta de bombeo puede haber más de un equipo de bombeo, se considera que todas las bombas son iguales. También puede simularse una conducción con plantas de bombeo en serie, los equipos de bombeo de una planta a otra pueden ser diferentes.

A continuación, se indica la información que debe proporcionarse para simular la suspensión súbita del bombeo.

5.2.1 Suspensión súbita del bombeo cuando la planta de bombeo está en la frontera aguas arriba del sistema

En la Figura 5.7 se muestran los pasos para dar de alta el evento correspondiente al paro súbito de los equipos de bombeo cuando la planta de bombeo está en la frontera aguas arriba de la conducción.



Figura 5.7 Paro súbito del bombeo en plantas de bombeo ubicadas en la frontera aguas arriba del acueducto

A continuación, se presenta la información que debe proporcionarse.

Propiedades generales.

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la planta de bombeo.
- ❖ Color, opcional, puede elegirse un color.
- ❖ Número de bombas, es el número de bombas que operan en paralelo en una planta de bombeo para suministrar el gasto de operación o diseño del acueducto. Se considera que todas las bombas tienen iguales características y entregan igual caudal y carga.
- ❖ Instante en el que paran las bombas [s], el paro de las bombas puede ser posterior al inicio de la simulación. Durante el tiempo que transcurre entre el inicio de la simulación ($t = 0$) y el instante en el que paran las bombas, los cálculos de la simulación corresponden a la operación en flujo permanente. Cuando el valor de Instante en el que paran las bombas es mayor que el tiempo de simulación las bombas nunca paran.
- ❖ Elevación del nivel de succión [msnm], es la cota de elevación de la superficie libre del agua en el cárcamo de succión o el nivel de succión, Figura 5.11.
- ❖ Cadenamiento planta de bombeo [m], es la ubicación de la planta de bombeo respecto a la topografía del terreno con la que se deberán comparar las

piezométricas máximas y mínimas que se presentan durante el tiempo de simulación del transitorio.

- ❖ Tipo de válvula en la descarga de las bombas, las válvulas en la descarga de las bombas pueden ser de cierre controlado o de no retorno también llamadas de retención o check, ver Figura 5.8.

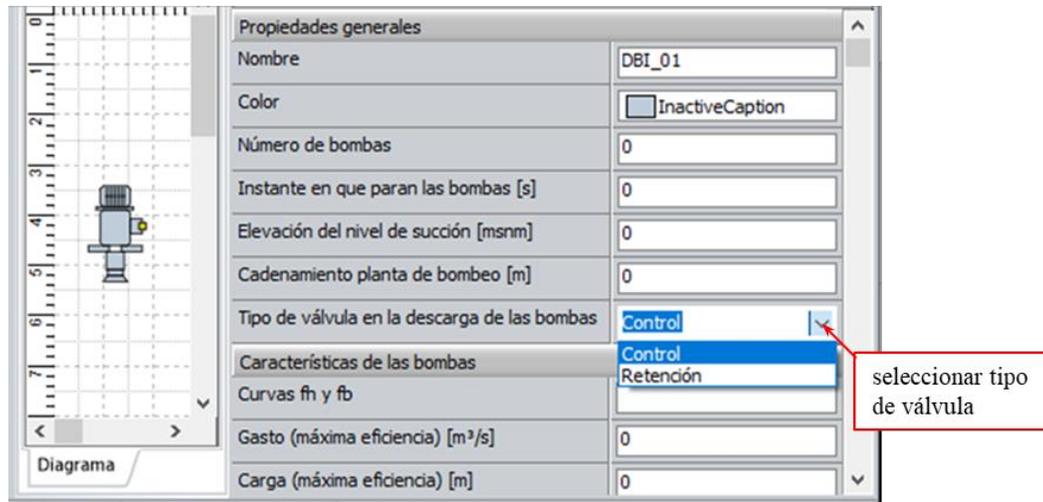


Figura 5.8 Elección del tipo de válvula en la descarga de las bombas

Características de las bombas.

La información que debe proporcionarse en esta sección corresponde a las características de diseño del equipo de bombeo que proporciona el fabricante, esta información se utiliza para calcular la velocidad específica de las bombas y el momento de inercia del conjunto motor-bomba, ver Anexo A10. A manera de información, tanto el momento de inercia como la velocidad específica calculados por TransDocencia, se despliegan en la sección de mensajes.

- ❖ Curvas fh y fb, a través de estas curvas se simula la operación transitoria de las bombas. TransDocencia contiene información para varios tipos de bombas (pestaña Catálogos y después Curvas de bombas), su elección se realiza a través de la velocidad específica de las bombas del proyecto (ver Figura 5.9). Si en el catálogo de bombas no hay información para la velocidad específica obtenida con la Ecuación 5.1, puede utilizarse la de la velocidad específica más cercana.

- ❖ Gasto (máxima eficiencia) [m^3/s], es el gasto de diseño de la bomba.
- ❖ Carga (máxima eficiencia) [m], es la carga de diseño de la bomba
- ❖ Número de pasos o tazones, (número de etapas o número de impulsores), ver Sección A10.1.
- ❖ Número de succiones, se indica si se trata de bombas de succión simple o doble, ver Sección A10.1.
- ❖ Velocidad nominal [rpm], es la velocidad de diseño de la bomba.
- ❖ Eficiencia máxima, es la eficiencia con la que opera la bomba en su punto de diseño.
- ❖ Velocidad específica [Ns], es la velocidad específica de la bomba, se calcula con la Ecuación A10.1.

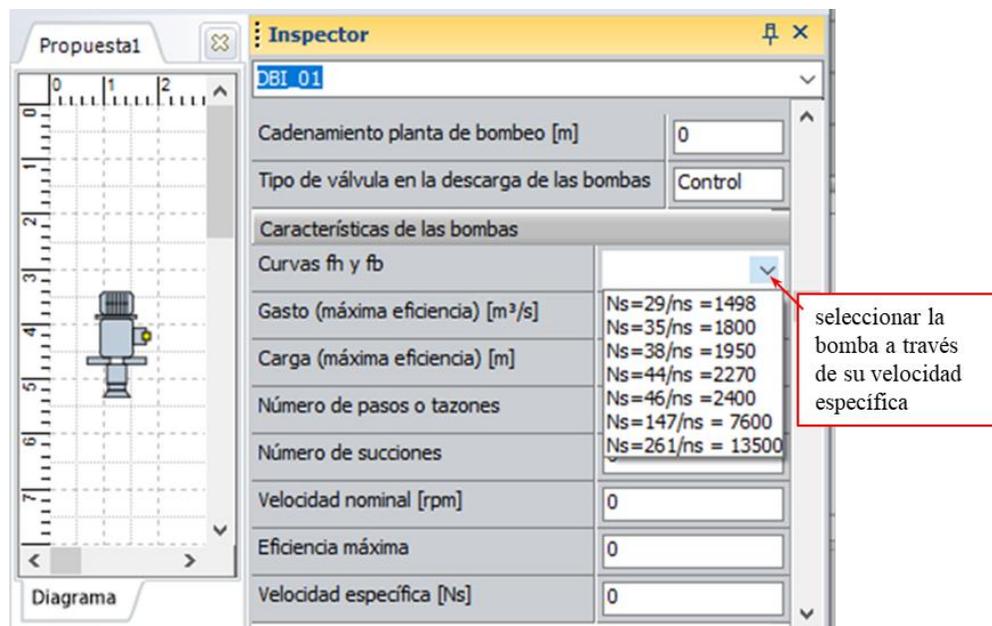


Figura 5.9 Elección del equipo de bombeo a través de su velocidad específica. N_S corresponde a unidades SI y n_s a unidades del sistema inglés

Operación de una bomba en flujo permanente.

En esta sección se indica el punto de operación de una bomba durante flujo estable, es común que éste difiera del punto de diseño de la bomba o punto de operación con máxima eficiencia, como es el caso del Ejemplo 4.

- ❖ Gasto por bomba [m^3/s], es el gasto de operación del sistema (gasto total) entre el número de bombas.
- ❖ Carga de bombeo [m], es la carga que entrega una bomba en flujo permanente.
- ❖ Eficiencia, se refiere a la eficiencia con la que trabaja una bomba en flujo permanente.

Datos de las válvulas de descarga.

La información que se pide en esta sección depende del tipo de válvula que hay en la descarga de las bombas, la cual debió indicarse en la sección Propiedades generales (Figura 5.8).

Cuando la válvula es del control (válvula de cierre programado), debe indicarse si es esférica o de mariposa (Figura 5.10), en ese caso los datos que deben darse son los siguientes.

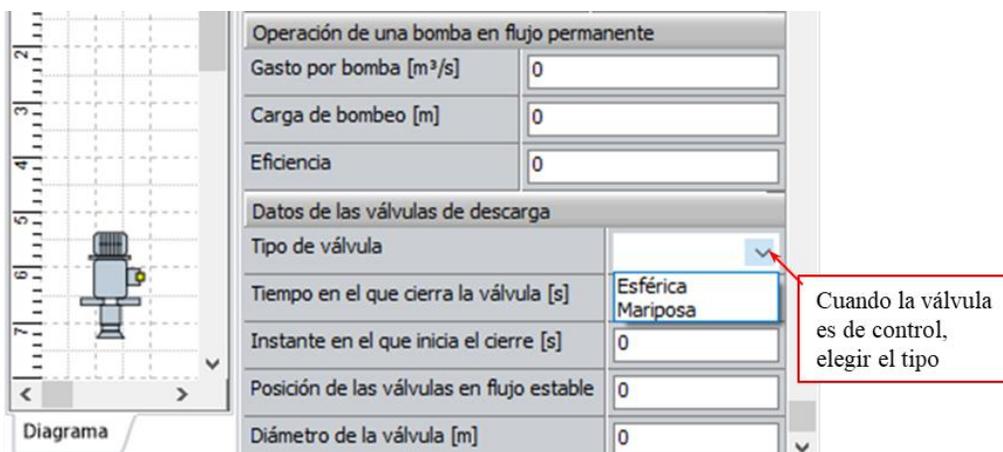


Figura 5.10 Cuando la válvula es de control, debe indicarse si es esférica o de mariposa

- ❖ Tipo de válvula, debe indicarse si es de mariposa o esférica.
- ❖ Tiempo en el que cierra la válvula [s], es el tiempo que tarda la válvula en pasar de su posición en flujo estable a totalmente cerrada.
- ❖ Instante en el que inicia el cierre [s], es el tiempo que transcurre entre el inicio de la simulación y el inicio del cierre de la válvula. Para simular que la válvula no cierra en el transitorio este tiempo debe ser mayor que el tiempo de simulación.

- ❖ Posición de las válvulas en flujo estable, se refiere al grado o porcentaje de apertura de la válvula en flujo permanente. La relación entre el grado de apertura y el coeficiente de pérdida de carga que introducen las válvulas incluidas en TransDocencia (pestaña Catálogos y después Curvas de válvulas) se muestran en las Figuras 3.6 y 5.5. Se observa que, posición igual a cero significa que la válvula está completamente cerrada, posición igual a 90 corresponde a totalmente abierta.
- ❖ Diámetro de la válvula [m], es el diámetro de la válvula, debe ser congruente con el diámetro de la tubería de descarga de la bomba.

Cuando se indicó (Figura 5.8) que la válvula en la descarga es de retención (no retorno o check), el único dato que se pide es:

- ❖ Coeficiente mínimo de pérdida [s^2/m^5], el valor preestablecido es 0.001, sin embargo, puede cambiarse.

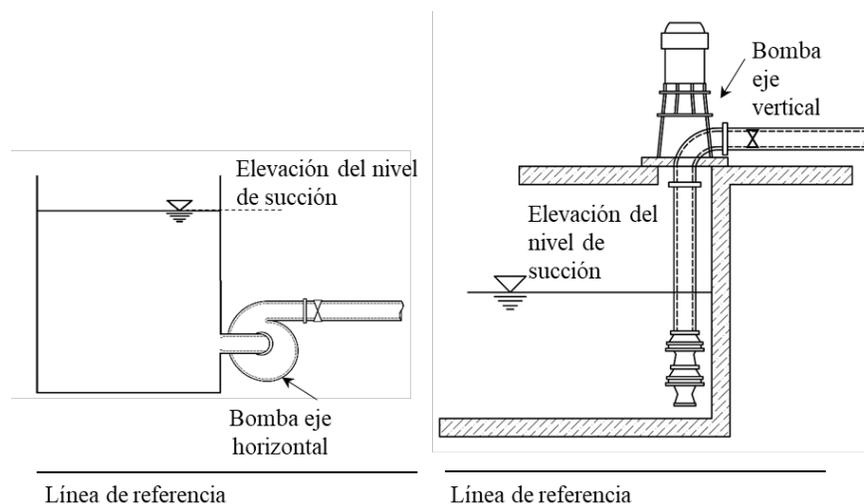


Figura 5.11 Tipo de bombas en la frontera aguas arriba

Al término de la simulación, en el archivo de cargas se graba, en mca, la carga piezométrica aguas abajo del conjunto bomba-válvula de descarga; en el archivo de gastos, el gasto por bomba en m^3/s y en el archivo de velocidades, la velocidad de las bombas en rpm, todas las variables como función del tiempo en s.

5.2.2 Simulación del paro súbito de equipos de bombeo ubicados entre tramos de la conducción

En la Figura 5.12 se muestran los pasos para dar de alta el evento correspondiente al paro súbito de los equipos de bombeo de una planta localizada a lo largo de la conducción. En este caso, las bombas dejan de operar al inicio de la simulación, es decir, en $t = 0$.

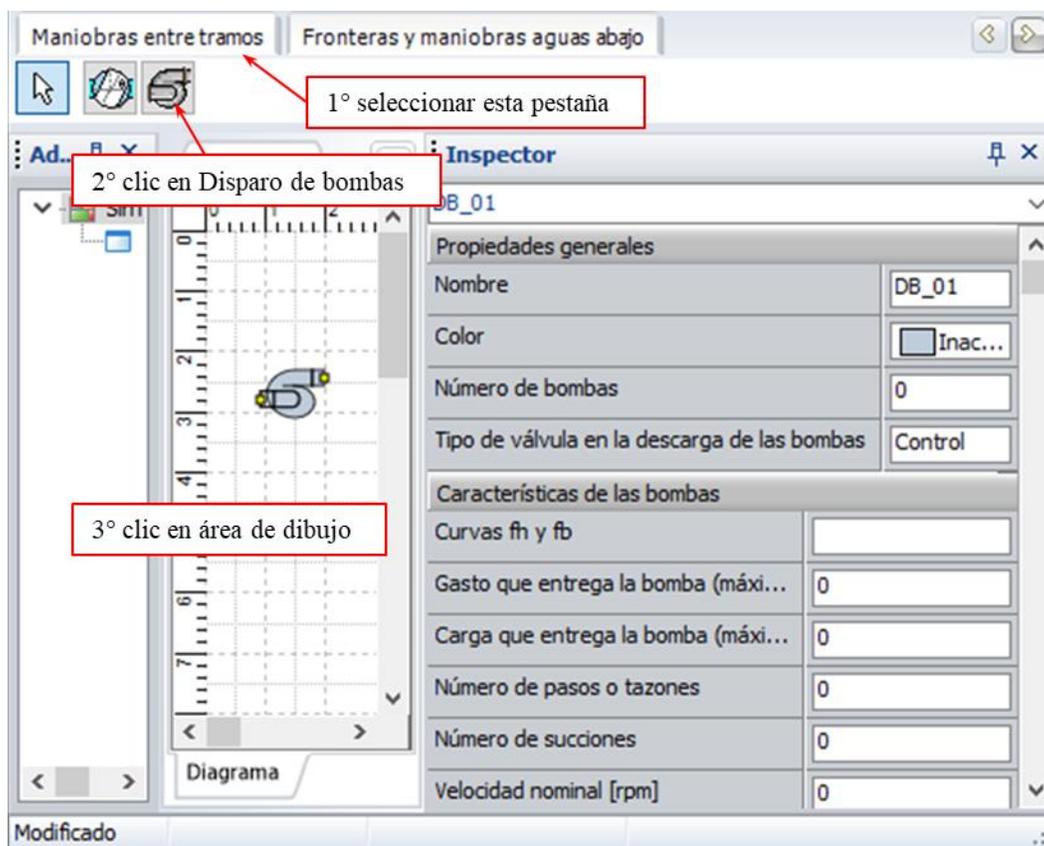


Figura 5.12 Paro súbito del bombeo en plantas ubicadas a lo largo de la conducción

La información necesaria para simular este evento es la siguiente.

Propiedades generales

- ❖ Nombre, opcional, con éste se identifica a la planta de bombeo.
- ❖ Color, opcional, puede elegirse un color.
- ❖ Número de bombas, es el número de bombas que operan en paralelo en la planta de bombeo para suministrar el gasto de operación o diseño del

acueducto. Se considera que todas las bombas tienen iguales características y entregan igual caudal y carga.

- ❖ Tipo de válvula en la descarga de las bombas, las válvulas en la descarga de las bombas pueden ser de cierre controlado o de no retorno también llamadas de retención o check, ver Figura 5.8.

Características de las bombas

La información que debe proporcionarse en esta sección corresponde a las características del equipo de bombeo que proporciona el fabricante, con esta información se determina la velocidad específica de las bombas y el momento de inercia del conjunto motor-bomba, ver Anexo A10. A manera de información, tanto el momento de inercia como la velocidad específica calculados por TransDocencia, se despliegan en la sección de mensajes.

- ❖ Curvas f_h y f_b , a través de estas curvas se simula la operación transitoria de las bombas. TransDocencia contiene información para varios tipos de bombas (pestaña Catálogos y después Curvas de bombas), su elección se realiza a través de la velocidad específica de las bombas del proyecto (ver Figura 5.9). Si en el catálogo de bombas no hay información para la velocidad específica obtenida con la Ecuación 5.1, puede utilizarse la de la velocidad específica más cercana.
- ❖ Gasto que entrega la bomba (máxima eficiencia) [m^3/s], es el gasto de diseño de la bomba.
- ❖ Carga que entrega la bomba (máxima eficiencia) [m], es la carga de diseño.
- ❖ Número de pasos o tazones, o número de impulsores, ver Sección A10.1.
- ❖ Número de succiones, se indica si se trata de bombas de succión simple o doble, ver Sección A10.1.
- ❖ Velocidad nominal [rpm], es la velocidad de diseño de la bomba.
- ❖ Eficiencia máxima, se refiere a la eficiencia con la que opera la bomba en su punto de diseño.
- ❖ Velocidad específica [Ns], es la velocidad específica de la bomba, se calcula con la Ecuación A10.1.

Operación de una bomba en flujo permanente.

En esta sección se indica el punto de operación de una bomba durante flujo estable, es común que éste difiera del punto de diseño de la bomba o punto de operación con máxima eficiencia. Se recuerda que las bombas que operan en paralelo en la misma planta de bombeo se considera que son iguales.

- ❖ Gasto por bomba [m^3/s], es el gasto de operación del sistema entre el número de bombas.
- ❖ Carga de bombeo [m], es la carga que entrega una bomba en flujo permanente.
- ❖ Eficiencia, se refiere a la eficiencia con la que trabaja una bomba en flujo permanente.

Datos de las válvulas de descarga

La información que se pide en esta sección depende del tipo de válvula que hay en la descarga de las bombas, la que debió indicarse en la sección Propiedades generales (Figura 5.13).

Cuando la válvula es de control, debe indicarse si es esférica o de mariposa (Figura 5.15). En ese caso los datos que deben darse son los siguientes.

- ❖ Tipo de válvula de control, debe indicarse si es de mariposa o esférica.
- ❖ Tiempo en el que cierra la válvula [s], es el tiempo que tarda la válvula en pasar de su posición en flujo estable a totalmente cerrada.
- ❖ Instante en el que inicia el cierre [s], es el tiempo que transcurre entre el inicio de la simulación y el inicio del cierre de la válvula. Para simular que la válvula no cierra en el transitorio este tiempo debe ser mayor que el tiempo de simulación.
- ❖ Posición de las válvulas en flujo estable, se refiere al grado o porcentaje de apertura de la válvula en flujo permanente. La relación entre el grado de apertura y el coeficiente de pérdida de carga que introducen las válvulas incluidas en TransDocencia (pestaña Catálogos y después Curvas de válvulas) se muestran en las Figuras 3.6 y 5.5. Se observa que, posición igual a cero significa que la válvula está completamente cerrada, posición igual a 90 corresponde a totalmente abierta.

- ❖ Diámetro de la válvula [m], es el diámetro de la válvula, debe ser congruente con el diámetro de la tubería de descarga de la bomba.

Cuando se indicó (Figura 5.8) que la válvula en la descarga es de retención (no retorno o check), el único dato que se pide es:

- ❖ Coeficiente mínimo de pérdida [s^2/m^5], el valor preestablecido es 0.001, sin embargo, puede cambiarse.

Al término de la simulación, en el archivo de cargas se graban, en mca, las cargas piezométricas aguas arriba (carga en la succión) y abajo (carga en la descarga) del conjunto bomba-válvula de descarga; en el archivo de gastos, el gasto por bomba en m^3/s y en el archivo de velocidades, la velocidad de las bombas en rpm, todas las variables como función del tiempo en s.

6. Gráficas de resultados y reporte de la simulación

Como se mencionó en el Capítulo 2, los resultados de las simulaciones se almacenan en cinco archivos con formato csv y se crea un archivo tipo texto que contiene el reporte de la misma. Al terminar una simulación, se muestra la pantalla de la Figura 2.4 y se activan los botones del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación”, como se muestra en la Figura 6.1.

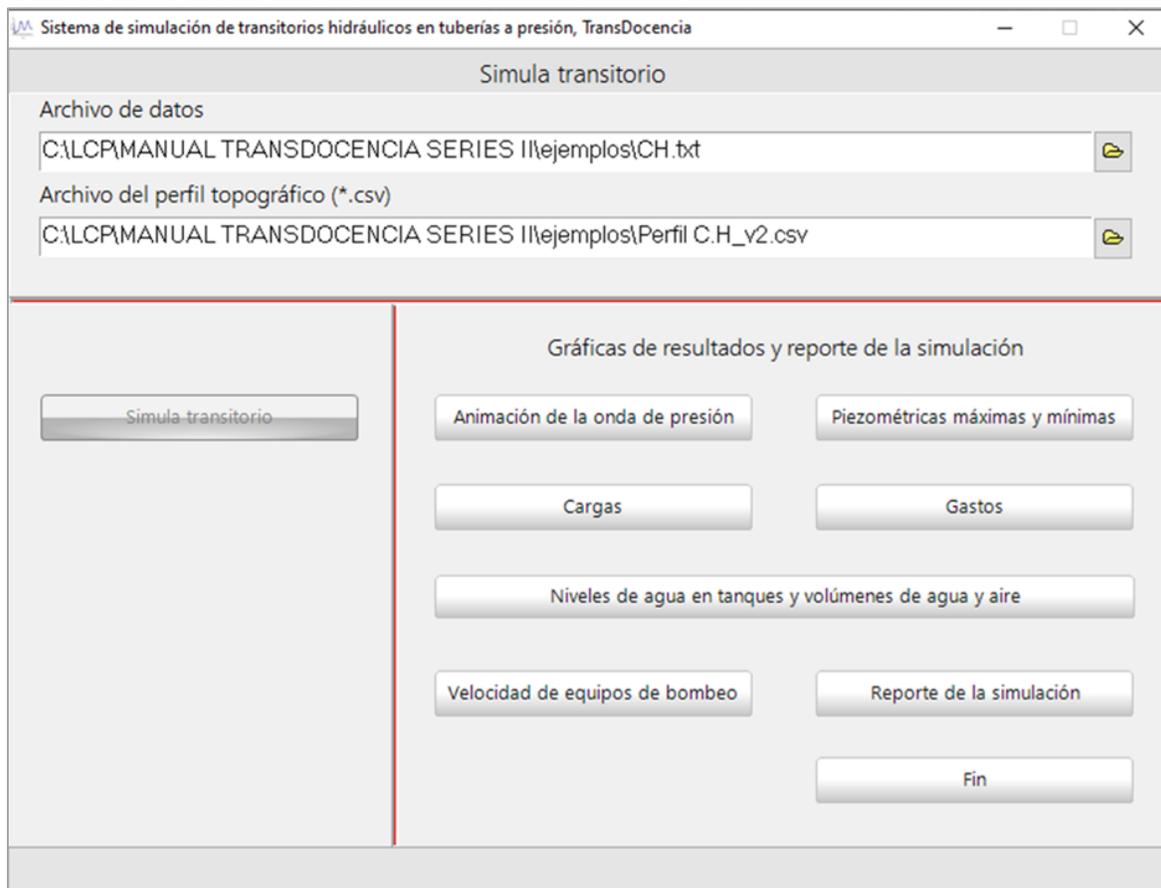


Figura 6.1 Al término de una simulación, se activan los botones para analizar a través de gráficas los resultados de la simulación

6.1 Animación de la onda de presión

Se muestra la evolución de la onda de presión a lo largo de la conducción, al seleccionar *Animación de la onda de presión* se despliega la pantalla de la Figura 6.2.

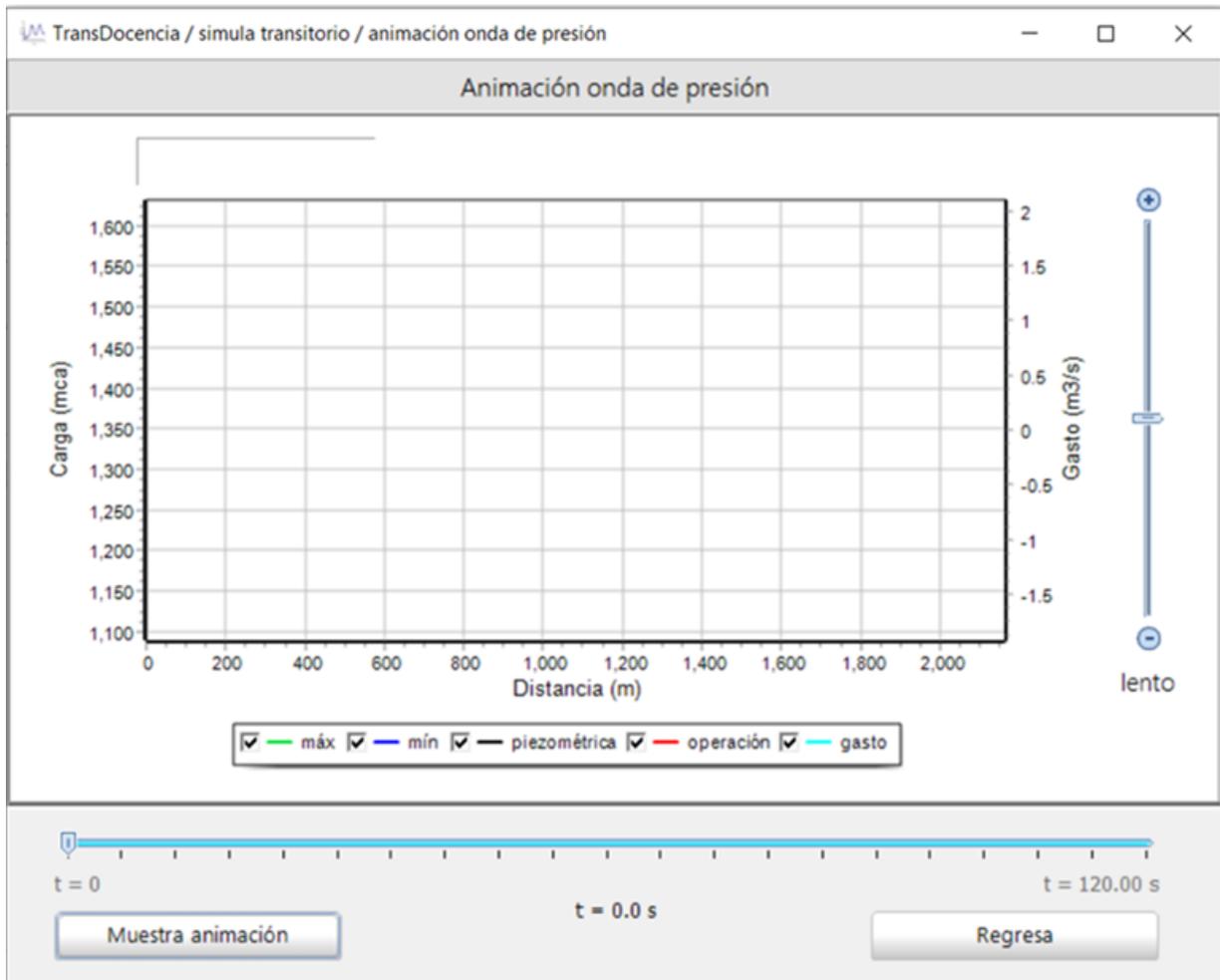


Figura 6.2 Animación de la onda de presión

El control de la presentación de la animación de la onda de presión puede realizarse con el ratón y con el teclado, como se indica a continuación.

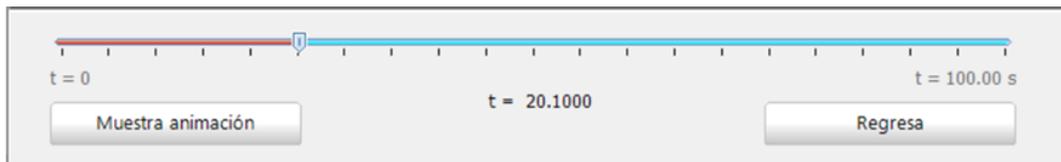
- Inicio de la animación.
Oprimir *Muestra animación* o teclear Enter.

- Detener la animación.
Con el teclado, oprimir cualquier tecla alfanumérica o con el ratón oprimir el botón izquierdo. Las gráficas que se observan al congelar la imagen corresponden al tiempo que se indica abajo de la barra del tiempo (Figura 6.3).
- Continuar la animación.
Con el teclado, oprimir cualquier tecla alfanumérica o si se usa el ratón, colocar el cursor sobre panel inferior (Figura 6.3) y oprimir el botón izquierdo.
- Ir al inicio de la animación.
Usar la tecla Inicio o arrastrar con el ratón el indicador del tiempo (Figura 6.3) al extremo izquierdo de la barra de tiempo.
- Ir al final de la animación.
Usar la tecla Fin o arrastrar con el ratón el indicador del tiempo (Figura 6.3) al extremo derecho de la barra de tiempo.
- Avanzar la animación a intervalos pequeños de tiempo.
Usar cualquiera de las teclas → ↑
- Avanzar la animación a intervalos grandes de tiempo.
Usar la tecla RePág. Un inconveniente que se presenta es que la gráfica y el indicador del tiempo no se actualizan automáticamente, para actualizarlos se debe oprimir el marcador del tiempo, el cual cambia de color (Figura 6.4).
- Retroceder la animación a intervalos pequeños de tiempo.
Usar cualquiera de las teclas ← ↓
- Retroceder la animación a intervalos grandes de tiempo.
Usar la tecla AvPág. Un inconveniente que se presenta es que la gráfica y el indicador del tiempo no se actualizan automáticamente, para actualizarlos se debe oprimir el marcador del tiempo, el cual cambia de color (Figura 6.4).
- Presentación lenta.
Arrastrar hacia abajo el selector de velocidad con el ratón (Figura 6.5).
- Presentación rápida.
Arrastrar hacia arriba el indicador de velocidad con el ratón (Figura 6.5).

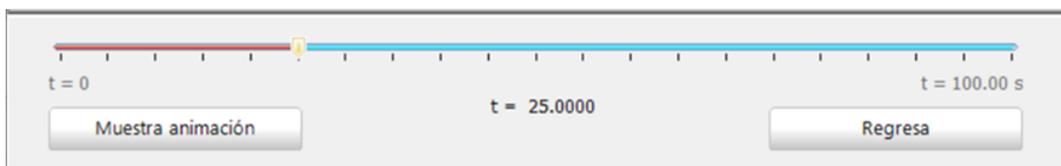
- Mostrar coordenadas de un punto.
Primero poner en pausa la animación y después oprimir el botón izquierdo del ratón sobre la curva (Figura 6.5).
- Cambiar de color una curva.
Primero poner en pausa a la animación y después oprimir el botón izquierdo del ratón sobre la curva (Figura 6.5).
- Amplificación o zoom.
Seleccionar el área que se desea amplificar arrastrando el ratón desde arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha.
- Quitar amplificación o zoom.
Arrastrar el ratón desde abajo a la derecha hacia arriba a la izquierda en cualquier sitio del plano cartesiano.
- Cerrar la pantalla de la animación de la onda de presión.
Seleccionar *Regresa*.



Figura 6.3 Panel inferior de la pantalla de animación de la onda de presión



(a)



(b)

Figura 6.4 Cuando se usan las teclas RePág o AvPág, la gráfica y el tiempo deben actualizarse oprimiendo el marcador de tiempo, el cual cambia de color. En (a) el tiempo no está actualizado, en (b) el tiempo ya se actualizó

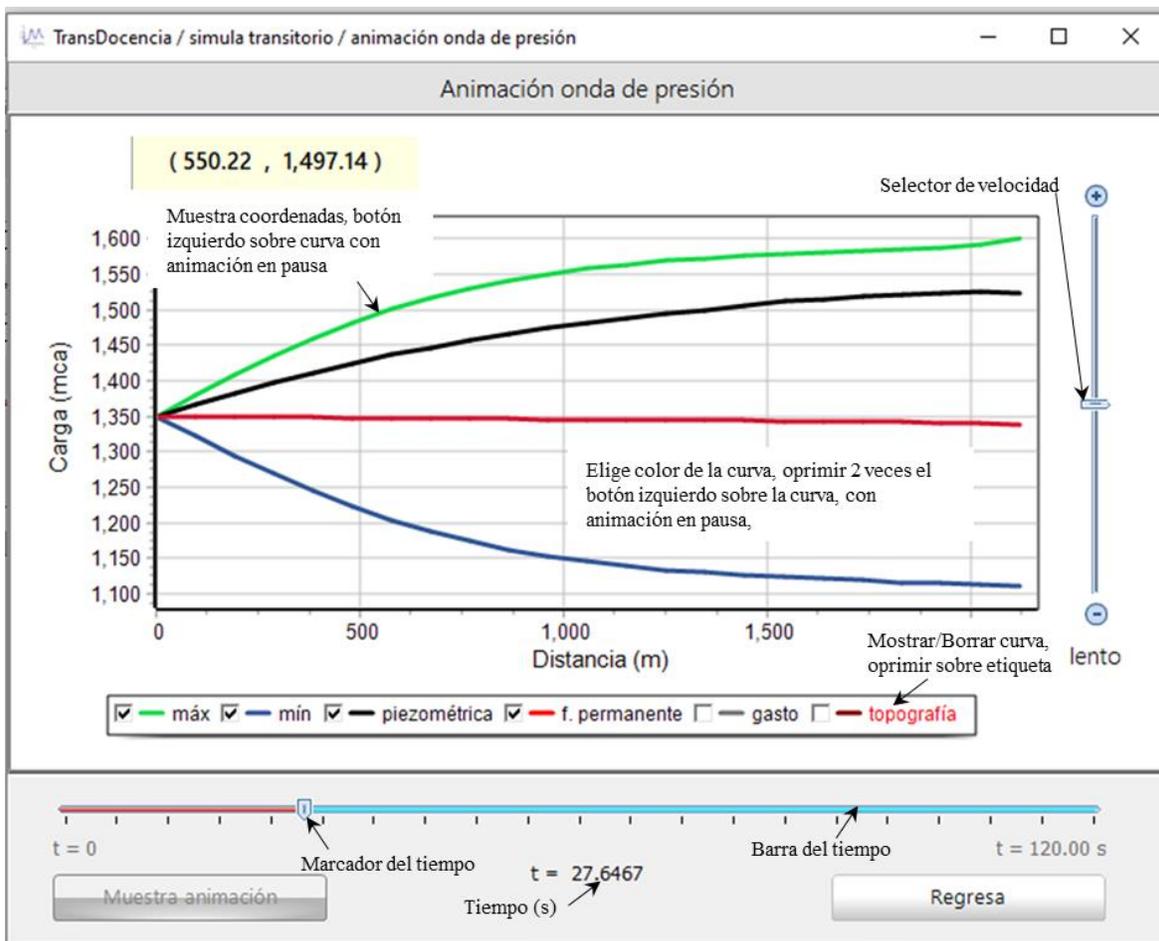


Figura 6.5 Área de presentación de la onda de presión y algunas acciones que pueden realizarse

6.2 Piezométricas máximas y mínimas en función de la posición

Al seleccionar *Piezométricas máximas* y *mínimas*, se muestran como función de la posición, las cargas piezométricas en flujo permanente y las cargas máximas y mínimas obtenidas durante el periodo de simulación. Cuando existe el archivo con la topografía también se muestra el perfil topográfico.

A continuación, se indican las acciones que pueden realizarse a través de las gráficas, algunas de ellas se muestran en las Figuras 6.6 a 6.9.

- Mostrar las coordenadas de un punto de la curva, oprimir el botón izquierdo del ratón en el punto, Figura 6.6.

- Cambiar color de la curva, oprimir dos veces el botón izquierdo del ratón, Figura 6.7.
- Copiar la gráfica al portapapeles para después copiarlas a Word, Excel, etc., oprimir el botón izquierdo del ratón en cualquier sitio de la gráfica, Figura 6.8.
- Mostrar o borrar una curva, oprimir el botón izquierdo del ratón sobre el nombre de la curva, el cual cambia a color rojo, Figura 6.9.
- Zoom, arrastrar el cursor en diagonal de izquierda superior a derecha inferior cubriendo la sección de la curva que desea amplificarse.
- Quitar zoom, arrastrar el cursor en diagonal de derecha inferior a izquierda superior en cualquier sitio de la gráfica. Esta opción también es útil cuando por alguna razón dejamos de observar la curva.
- Grabar archivo de datos en disco, oprimir *Graba archivo cargas máximas, mínimas y operación (*.csv)* el archivo se guarda en formato csv con el nombre y en la dirección que el usuario indique, éste puede ser consultado y graficado en Excel en cualquier momento.

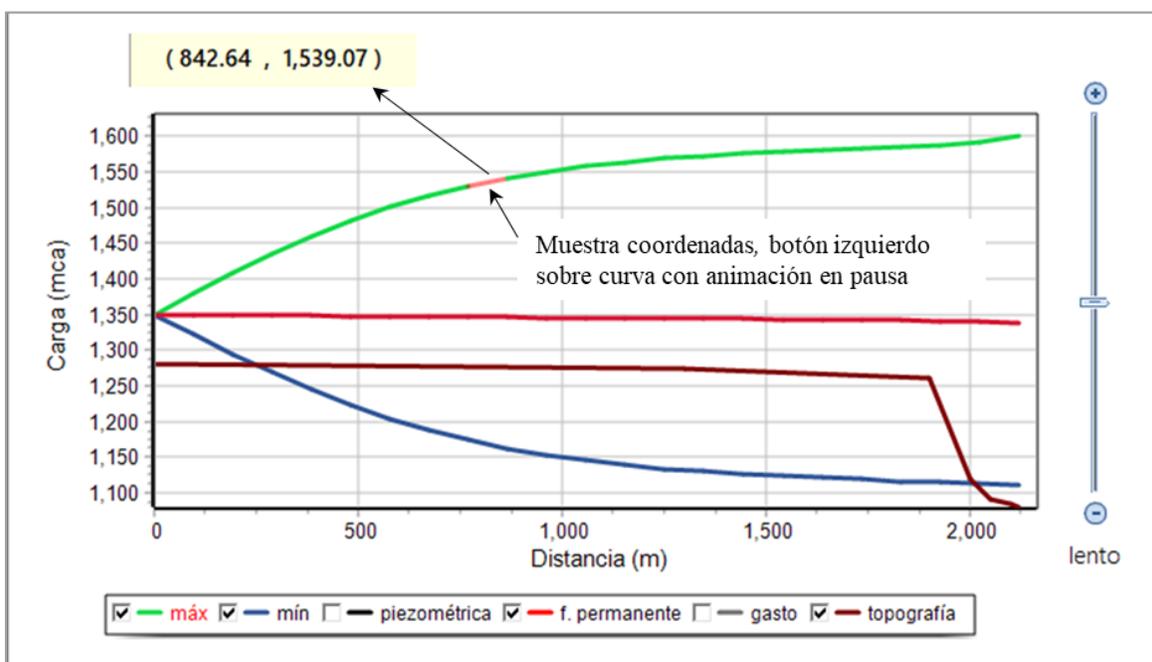


Figura 6.6 Se muestran las coordenadas del punto señalado

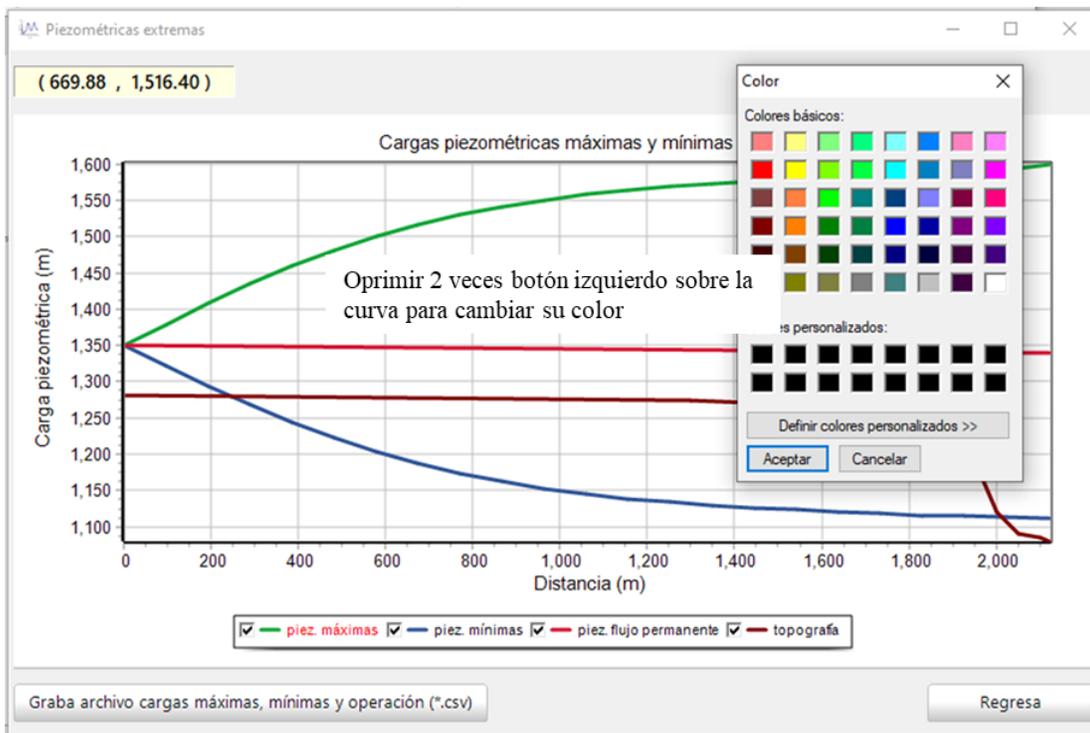


Figura 6.7 Se elige el color de la curva

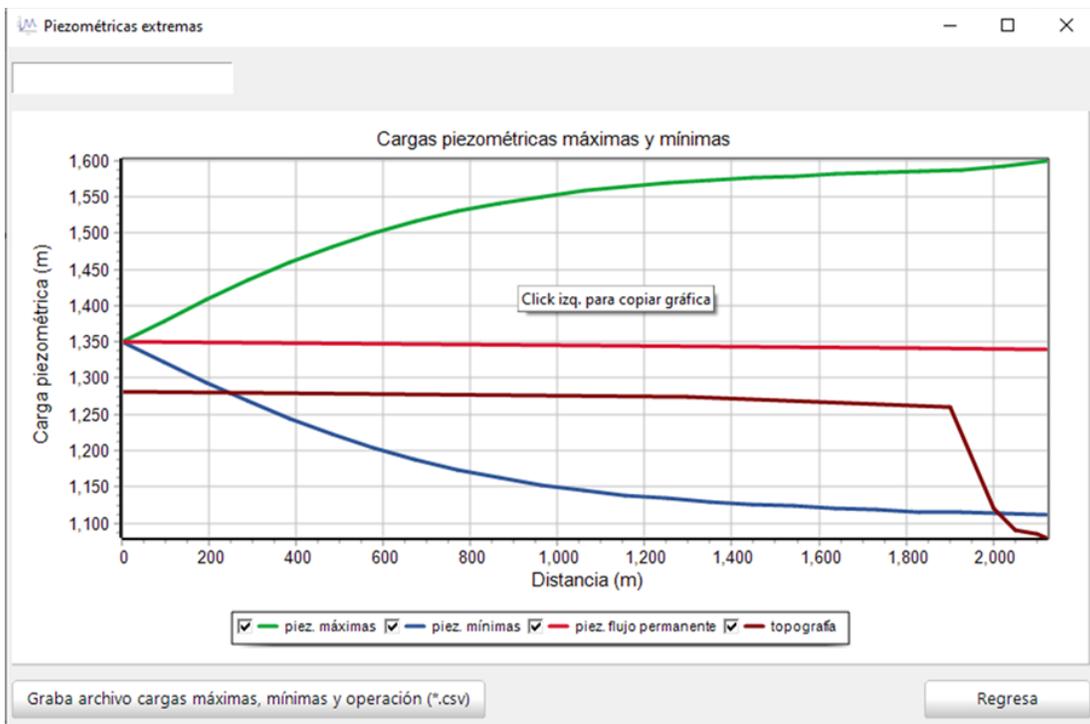


Figura 6.8 Se copia la gráfica en el portapapeles para copiarla a Word, Excel, etc.

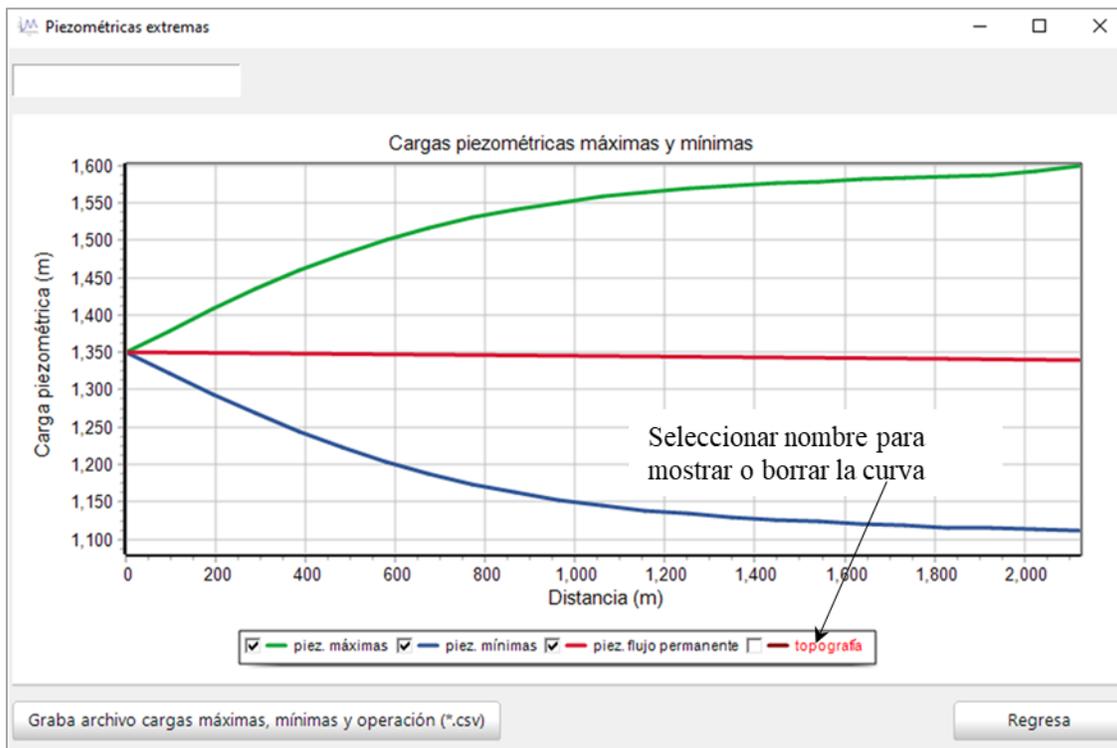


Figura 6.9 Se muestra o borra la curva cuyo nombre está en color rojo

6.2.1 Formato del archivo con la topografía, trazo de la tubería o perfil del terreno

El archivo con el trazo de la tubería es un archivo tipo ascii con datos separados con comas, se puede crear con Excel o con cualquier editor de texto, como el block de notas.

El primer renglón de datos es de encabezados, las coordenadas de los puntos que determinan la topografía inician en el segundo renglón, la primera columna corresponde a la distancia (cadenamiento o longitud) y la segunda columna a la elevación, generalmente respecto al nivel del mar, a partir de la tercera columna se pueden incluir anotaciones.

Las Figuras 6.10 y 6.11 muestran cómo pueden crearse los archivos con el trazo de la conducción.

The image shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C
1	X	Y	
2	18793.1	2205.141	
3	18817.8	2206.908	
4	18842.6	2208.717	
5	18867.4	2209.668	
6	18889.4	2209.325	
7	18911.3	2208.395	
8	18933.3	2207.444	Nota 1
9	18955.2	2206.489	
10	18977.2	2205.532	
11	18999.2	2205.051	
12	19021.1	2204.32	
13	19043.7	2204.356	
14	19066.3	2204.433	Nota 2
15	19088.9	2203.971	
16	19111.5	2204.004	

Below the spreadsheet is a save dialog box with the following fields:

- Nombre de archivo: Ejemplo topografía
- Tipo: CSV (delimitado por comas) (*.csv)

Figura 6.10 El archivo con la información de la topografía, trazo de la tubería o perfil del terreno es tipo CSV. Los datos del perfil comienzan en la segunda línea

The image shows a text editor window with the following content:

```

ejemplo_pefil_BlockNotas.
Archivo Edición Formato V
x y (msnm)
0,1281.9
1900,1275
2400,1260,
2550,1120, nota 1
2700,1090,
2800,1084.9
3050,1084.9
3080,1084.9
3100,1084.9

```

Below the text editor is a save dialog box with the following fields:

- Nombre de archivo: ejemplo_pefil_BlockNotas.csv
- Tipo: Todos los archivos (*.*)

Figura 6.11 El archivo con el perfil del terreno puede crearse con cualquier editor de texto. Las coordenadas de los puntos comienzan en el segundo renglón, separados con coma sin espacios, la extensión del nombre del archivo es CSV

6.3 Variables como función del tiempo

A través de los botones *Cargas*, *Gastos*, *Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire* y *Velocidad de equipos de bombeo* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 6.1) se muestran las gráficas de las variaciones de esas mismas variables como función del tiempo. Todas las acciones que pueden realizarse en la gráfica de las cargas piezométricas máximas y mínimas, también están habilitadas para estas gráficas.

6.2.2 Carga piezométrica en función del tiempo

Al seleccionar *Cargas* de la Figura 6.1 se muestra una pantalla similar a la Figura 6.11, a través de ella se tiene acceso a las gráficas de las cargas piezométricas en función del tiempo, el nombre de las pestañas que se muestran en la Figura 6.12 es igual al nombre que se asignó a cada elemento hidráulico.

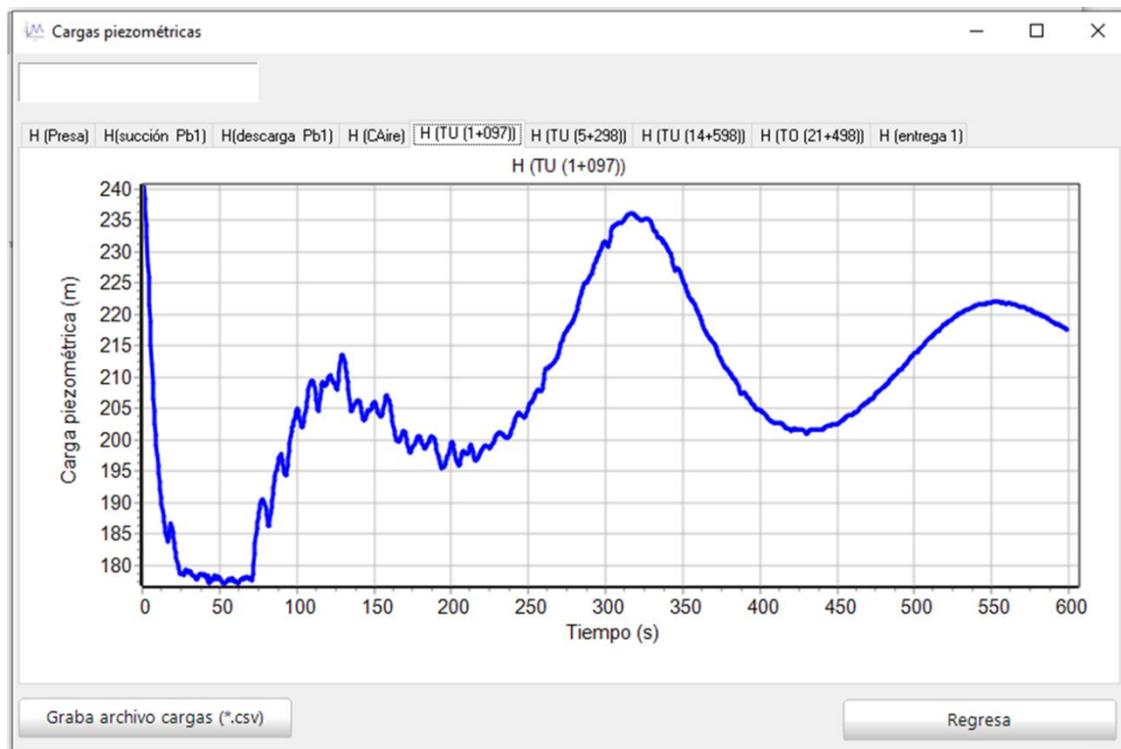


Figura 6.12 Gráficas de cargas piezométricas en función del tiempo

6.2.3 Gasto en función del tiempo

Al seleccionar Gastos de la Figura 6.1 se muestra la variación temporal del caudal intercambiado entre la conducción y el dispositivo hidráulico al que se refiere la gráfica, el nombre de cada pestaña es igual al nombre que se asignó a cada elemento o maniobra cuando se dio de alta, como se muestra en la Figura 6.13.

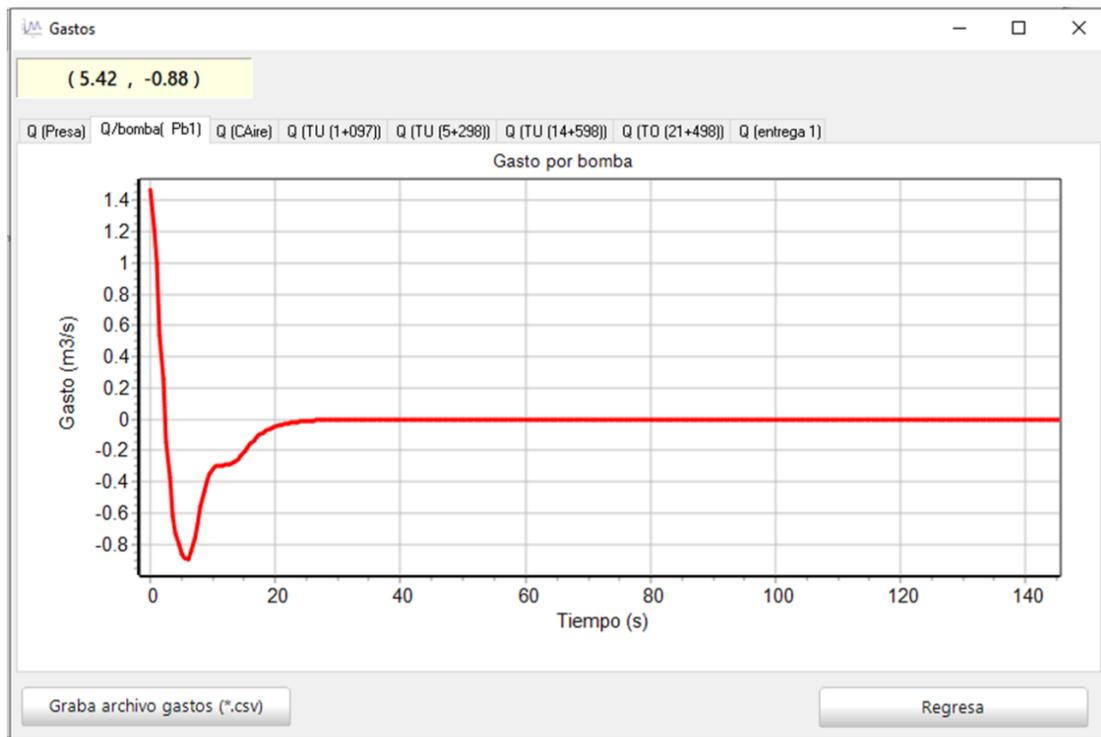


Figura 6.13 Gráficas de gasto en función del tiempo

6.2.4 Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire en función del tiempo

Al seleccionar *Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire* de la Figura 6.1 se grafica para tanques de oscilación, unidireccionales y cámaras de aire, la variación temporal de la elevación de la superficie libre del agua, para tanques unidireccionales, también se muestra el volumen de agua que entrega el tanque a la conducción. En el caso de válvulas de admisión y expulsión de aire se muestra el volumen de aire acumulado que ingresa a la tubería.

En la Figura 6.14 se muestra la variación de la lámina de agua en una torre de oscilación y en la Figura 6.15 el volumen de aire acumulado que ha ingresado a la tubería a través de una VAEA.

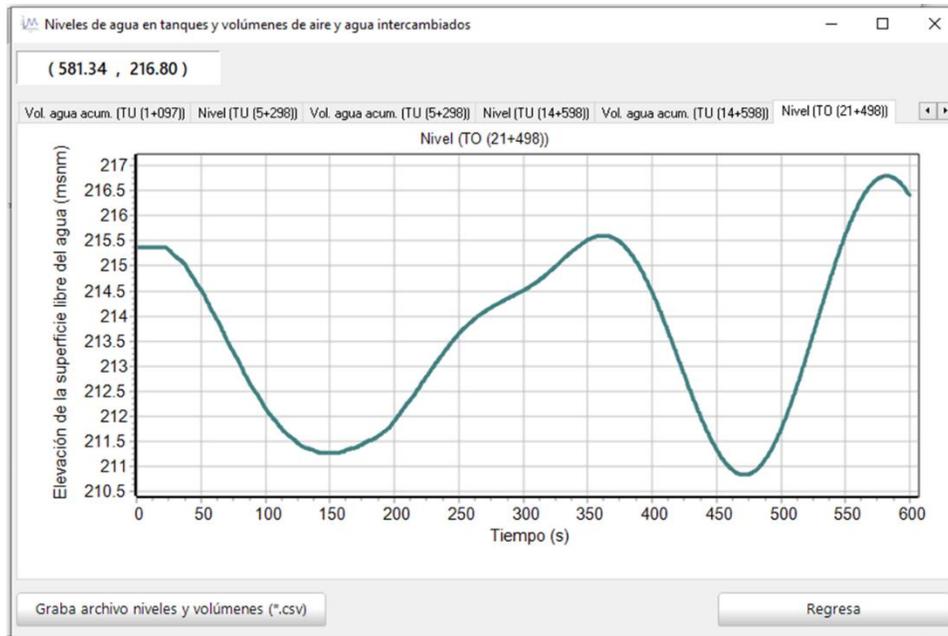


Figura 6.14 Gráficas de las variaciones de los niveles de agua en tanques y cámaras de aire en función del tiempo

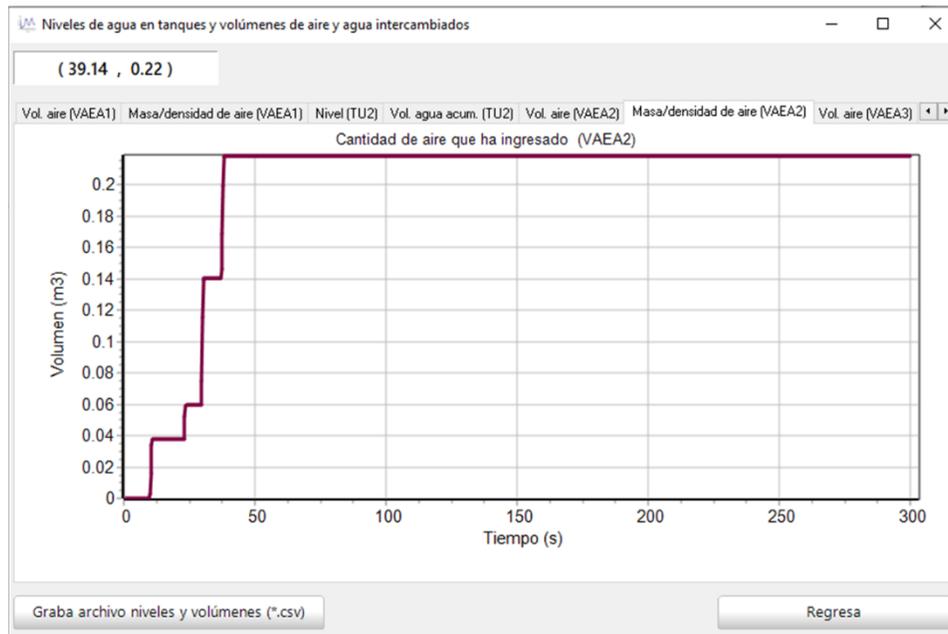


Figura 6.15 Cantidad de aire que ha ingresado a la tubería a través de una VAEA

6.2.5 Velocidad de equipos de bombeo en función del tiempo

Al seleccionar *Velocidad de equipos de bombeo* de la Figura 6.1 se muestra la variación de la velocidad de giro de las bombas en función del tiempo. En la Figura 6.16 se muestra un ejemplo.

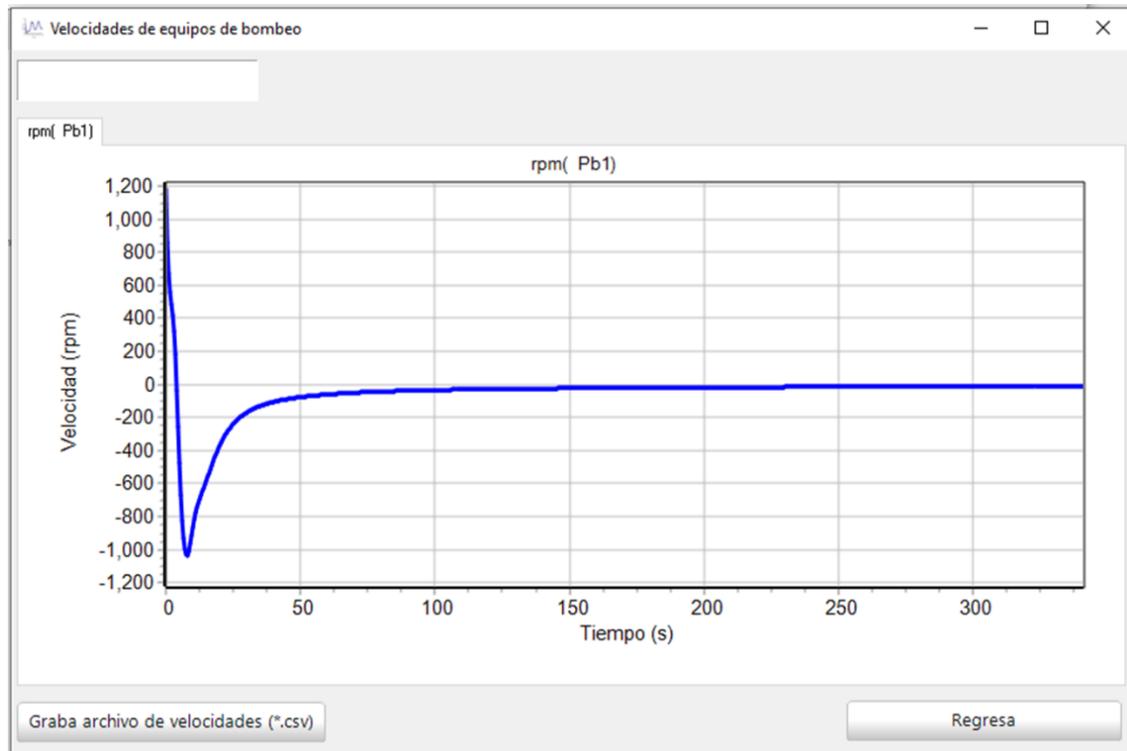


Figura 6.16 Variación de la velocidad de una bomba

6.2.6 Reporte de la simulación

Al seleccionar *Reporte* de la simulación de la Figura 6.1 se muestra información acerca de las características físicas del acueducto, de la maniobra que produjo el transitorio y de los flujos permanente y transitorio, en la Figura 6.17 se muestra un ejemplo.

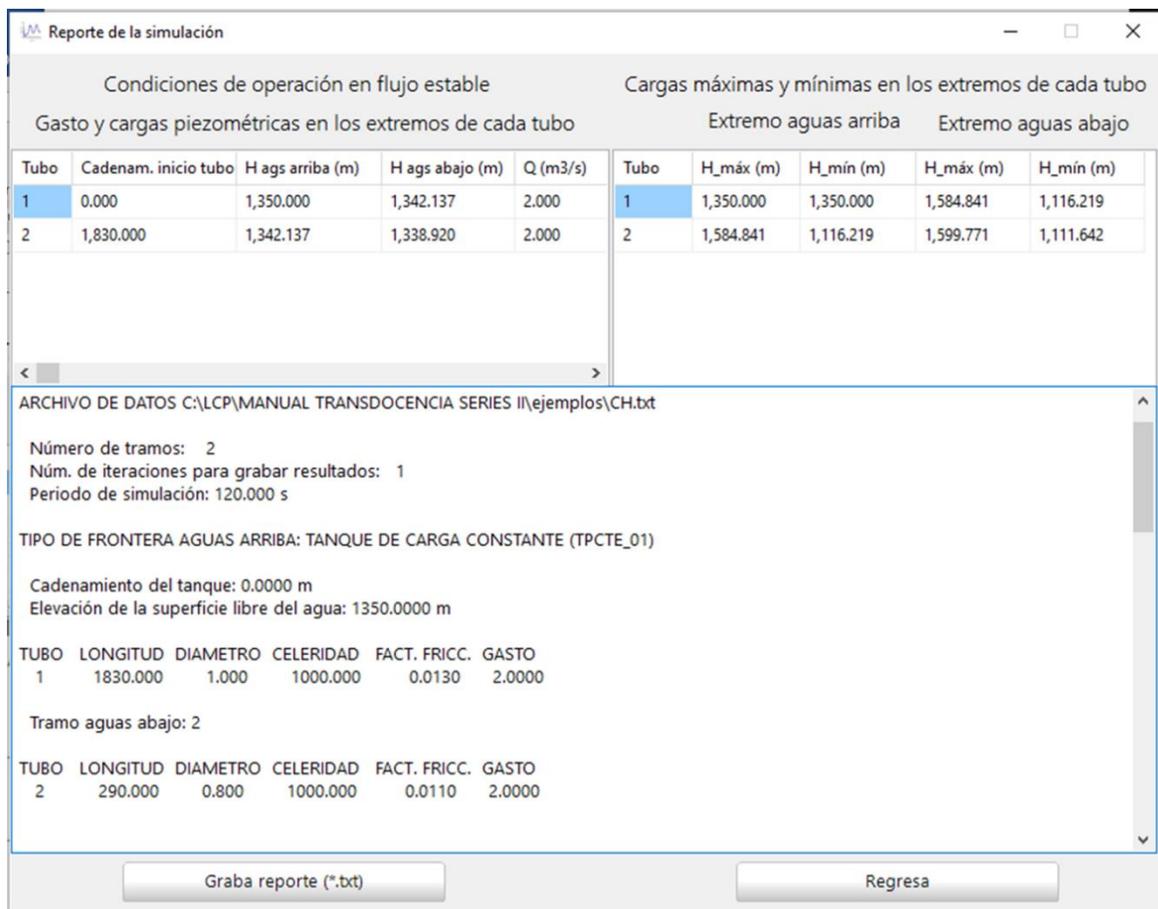


Figura 6.17 Reporte de la simulación

7. Ejemplos

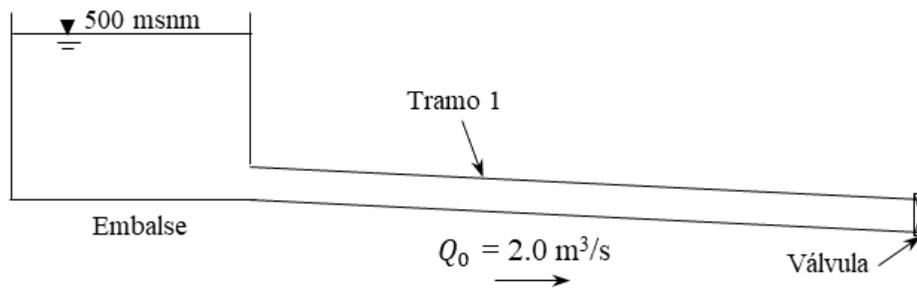
7.1 Ejemplo 1. Cierre de válvula en la frontera aguas abajo

El presente ejemplo consiste en simular el golpe de ariete producido por la maniobra de cierre “instantáneo” de una válvula ubicada en la frontera aguas abajo de una conducción. Como resultado de la simulación, a través de capturas de pantalla de la animación del viaje de la onda de presión, se muestra el cambio de la piezométrica durante el transitorio. La Figura 7.1 muestra el sistema hidráulico correspondiente.

El transitorio se describe con: i) el modelo de tubería elástica y fluido compresible (modelo de golpe de ariete) descrito con las ecuaciones A2.4 y A2.5 cuya solución se obtiene con el método de las características (Sección A2.2); ii) la condición de frontera aguas arriba (tanque de carga constante) descrito con la Ecuación A2.18 donde H_p es la carga en el tanque y iii) la condición de frontera aguas abajo (válvula que cierra) descrita con la Ecuación A9.7.

La conducción tiene una longitud de 5000 m, diámetro de 1.0 m, factor de fricción de Darcy Weisbach de 0.013, la velocidad de la onda de presión es de 1000 m/s, el gasto de operación en flujo permanente igual a 2 m³/s. La válvula esférica está totalmente abierta en flujo permanente, comienza a cerrarse a los 10 s de haber iniciado la simulación de la operación del sistema, aunque en la realidad no es posible, el cierre total se realiza de manera instantánea, lo que significa que el intervalo de tiempo para cerrar la válvula es menor o igual al intervalo de integración del método de las características (ver Anexo A2). Se considera constante la carga en el embalse. En este ejemplo no se requiere la cota de la válvula debido a que el movimiento de la válvula es independiente de la carga hidráulica, en este caso se trata de un cierre programado controlado con intervalo de tiempo establecido para cerrarla.

A través de la Figura 7.2 a la Figura 7.9 se indican los pasos a seguir para simular el transitorio.



Línea de referencia

Figura 7.1 El transitorio hidráulico se produce por el cierre de la válvula

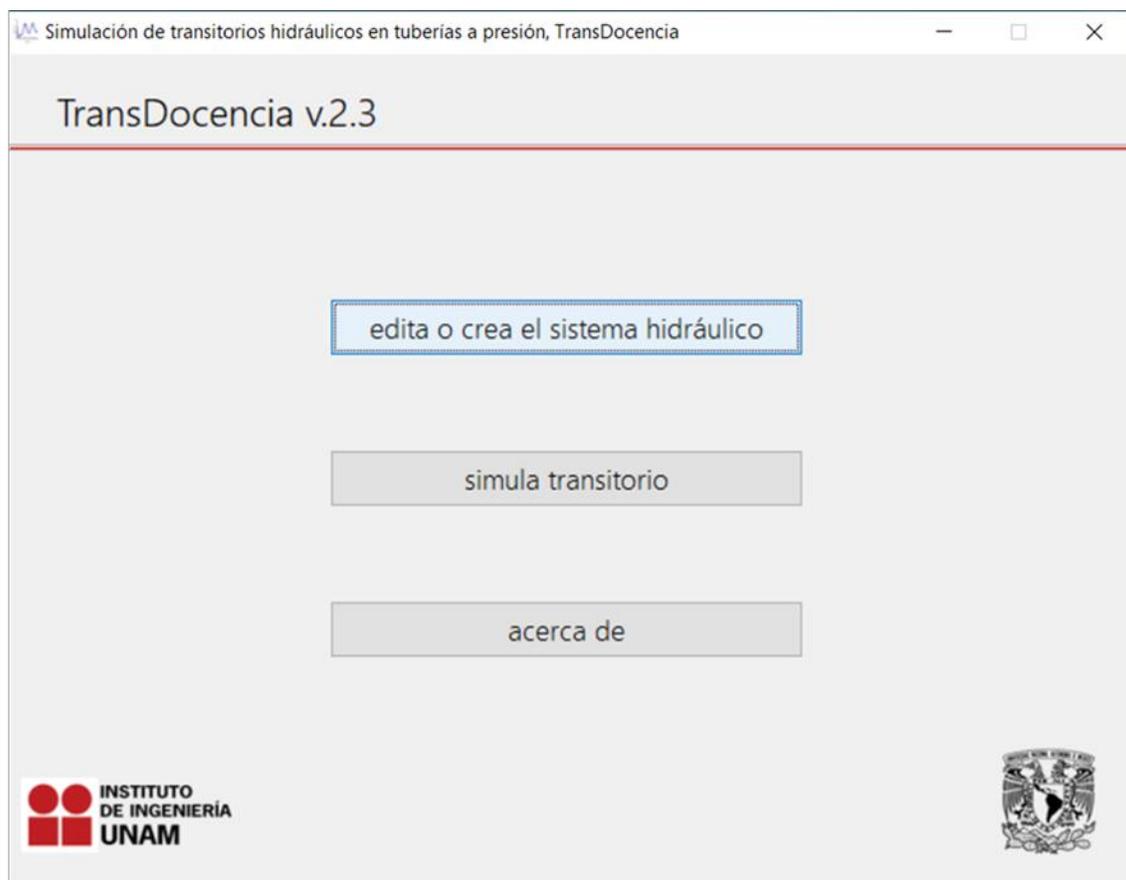


Figura 7.2 Seleccionar *edita o crea el sistema hidráulico*

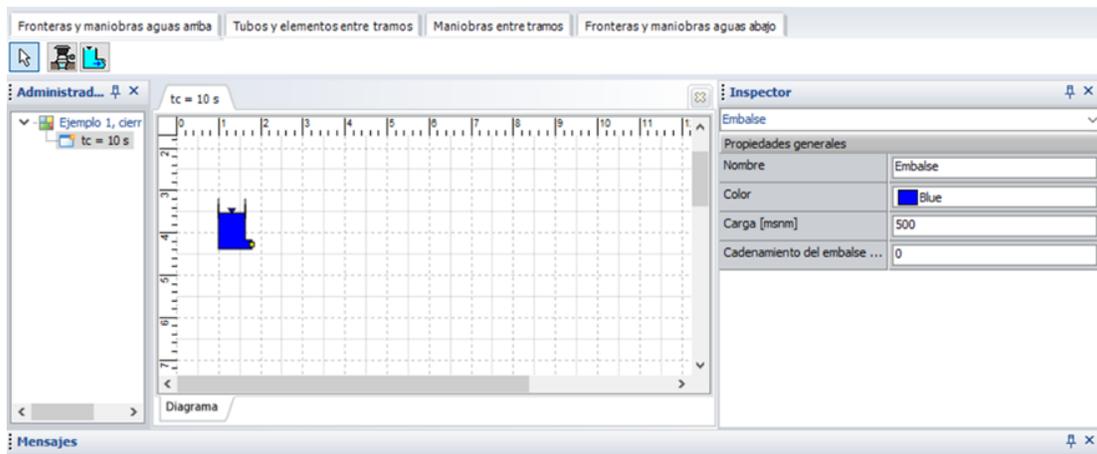


Figura 7.3 Se capturan las propiedades del embalse ubicado en la frontera aguas arriba

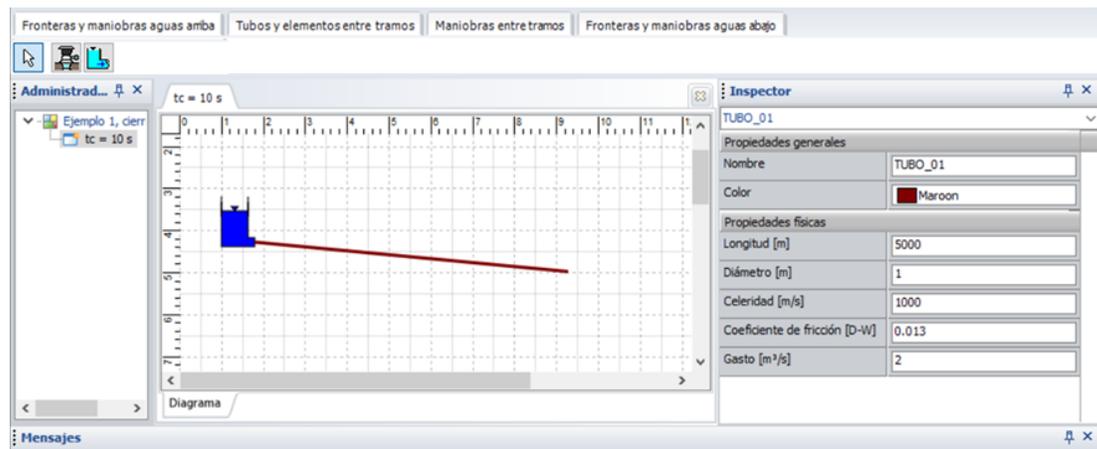


Figura 7.4 Se capturan las características de la tubería

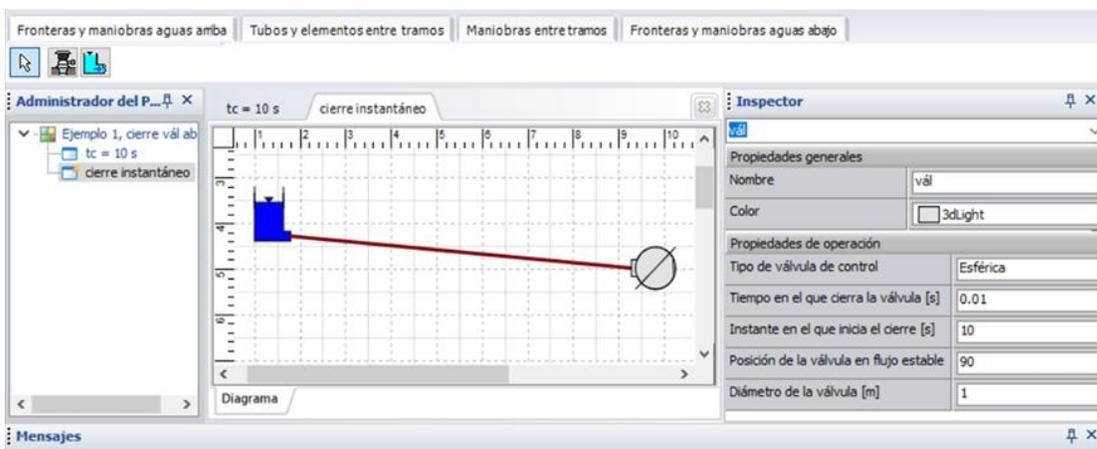


Figura 7.5 Se da de alta la válvula ubicada en la frontera aguas abajo, ver Sección 5.1.2.

Cuando todos los elementos del sistema hidráulico están conectados y todos los datos fueron aceptados en el proceso de validación, se abre la pantalla de la Figura 7.6 en donde se pide el intervalo de tiempo durante el cual se calcula la operación del sistema. En este caso los primeros 10 s de cálculo corresponden a flujo permanente porque en la Figura 7.5 se observa que la válvula comienza a cerrarse a los 10 s, antes de ese momento no ocurre evento alguno que modifique el flujo. En esa misma pantalla se muestra el intervalo de integración del método de las características, éste lo determina TransDocencia.

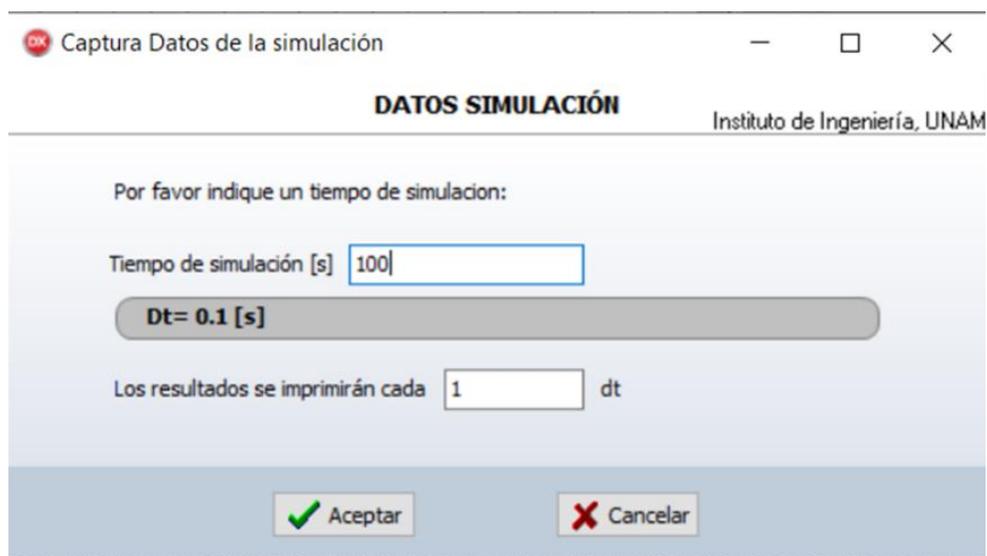


Figura 7.6 Al seleccionar el ícono de Guardar se muestra esta pantalla, siempre y cuando todos los elementos del sistema hidráulico están conectados y todos los datos fueron aceptados en el proceso de validación

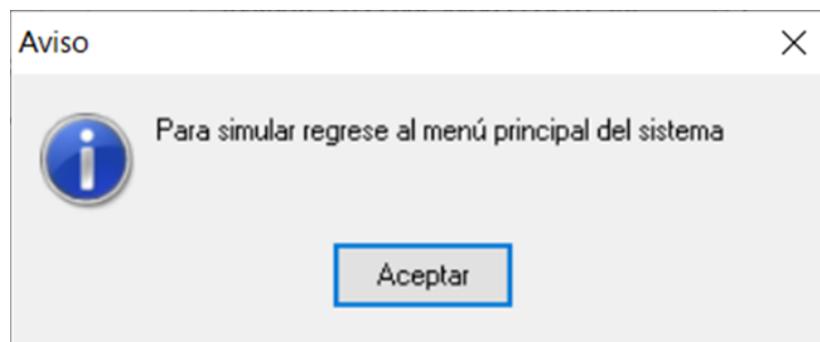


Figura 7.7 Los cálculos de la operación del sistema se realizan desde el menú principal (Figura 7.8)

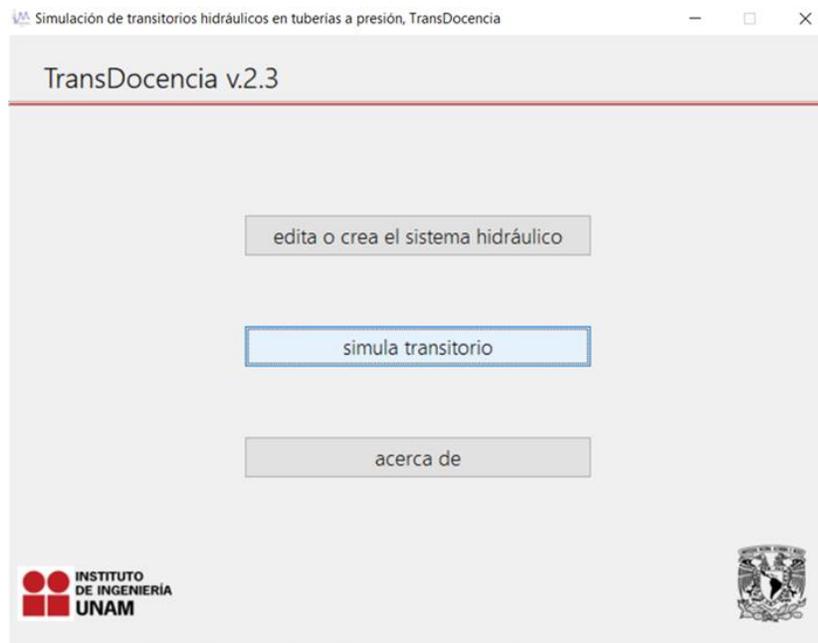


Figura 7.8 Se selecciona *simula transitorio* para realizar los cálculos

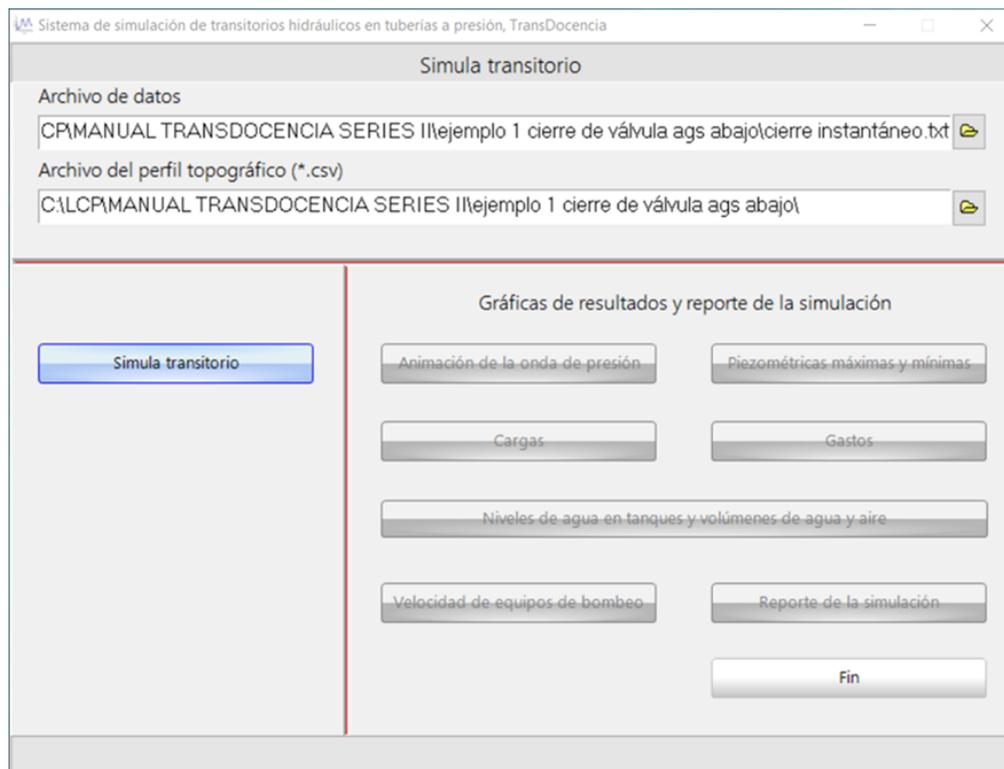


Figura 7.9 Se indica el nombre del archivo (ver Figura 7.10) que contiene tanto la información del sistema hidráulico como de la maniobra que produce el transitorio. En este caso no hay información del perfil topográfico



Figura 7.10 En este ejemplo, el nombre del archivo de datos es “cierre instantáneo.txt”. Se oprime *Simula transitorio* de la Figura 7.9

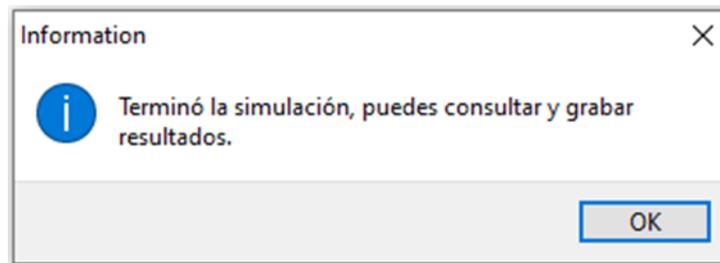


Figura 7.11 Esta pantalla se muestra cuando no hubo errores numéricos durante el cálculo de la operación hidráulica del sistema

Después de desplegarse el aviso de la Figura 7.11, se activan los botones del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” de la Figura 7.9, a través de estos se analizan los resultados de la simulación. Cabe mencionar que en este ejemplo no hay tanques ni válvulas de admisión y expulsión de aire, tampoco equipos de bombeo, por lo tanto, no existe información que se pudiera mostrar a través de los botones correspondientes.

7.1.1 Animación de la onda de presión

Las gráficas de las Figuras 7.12 a 7.24 son gráficas representativas de la animación de la onda de presión, a través de ellas se puede dar seguimiento a la propagación de la onda de presión. La línea negra representa la carga piezométrica correspondiente al instante que indica el contador de tiempo, la propagación de la onda de presión generada por el golpe de

ariete se observa a través de la modificación de la curva color negro entre cada figura, el gasto se muestra con la línea gris. Para tener una referencia del incremento y disminución de la presión se muestra la línea de cargas piezométricas en flujo permanente con línea roja, los valores máximos y mínimos de la piezométrica registrados desde el inicio de la simulación hasta el instante de tiempo que se indica, se muestran en color verde y azul, respectivamente.

Como se lee en los datos de la Figura 7.5, la válvula comienza a cerrarse a los 10 s de iniciada la simulación, lo que indica que durante los primeros 10 s de la simulación el sistema opera en régimen permanente. En la misma Figura se indica que el tiempo en que se realiza la maniobra de cierre es de 0.01 s, debido a que el incremento de integración del método de las características es de 0.01 s, como se muestra en la Figura 7.6, se trata de un cierre instantáneo. En $t = 10 + \Delta t = 10.01$ s la válvula está totalmente cerrada.

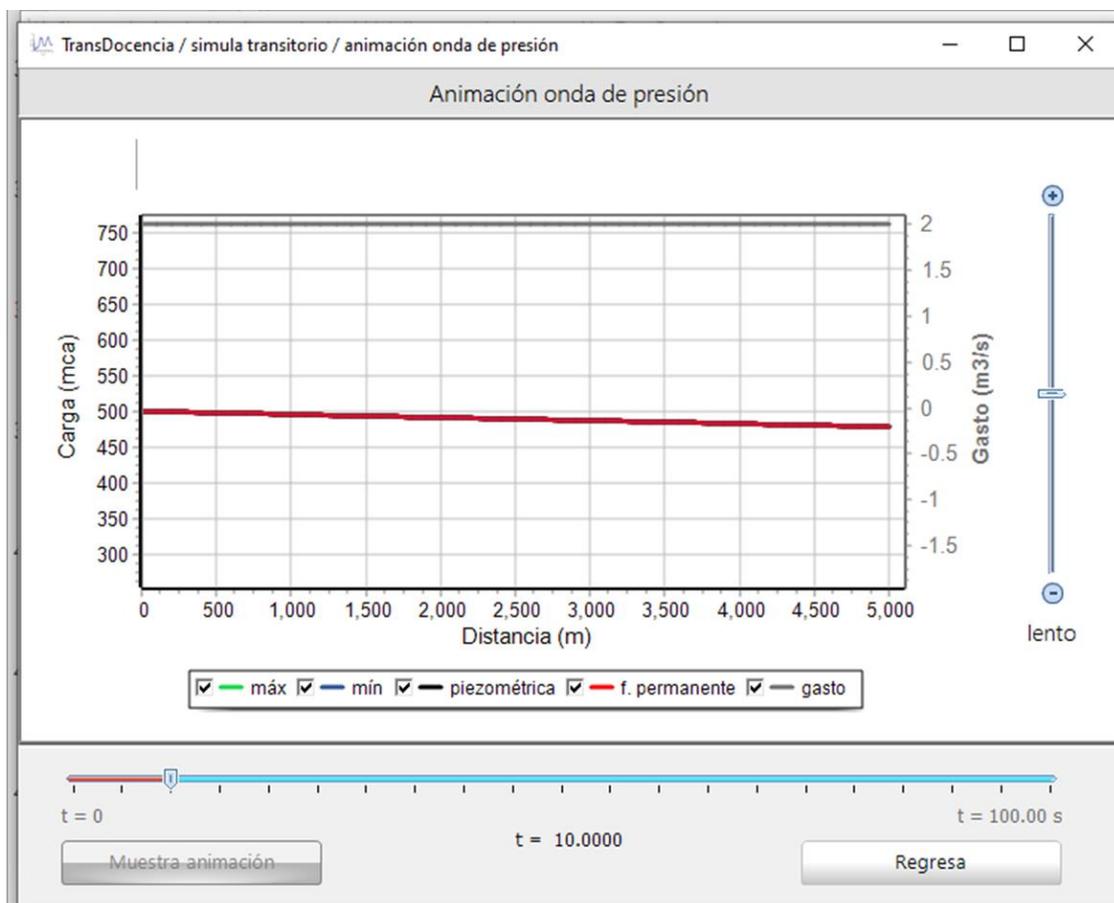


Figura 7.12 Durante los primeros 10 s el sistema opera con flujo estable, las curvas de color negra y rojo coinciden

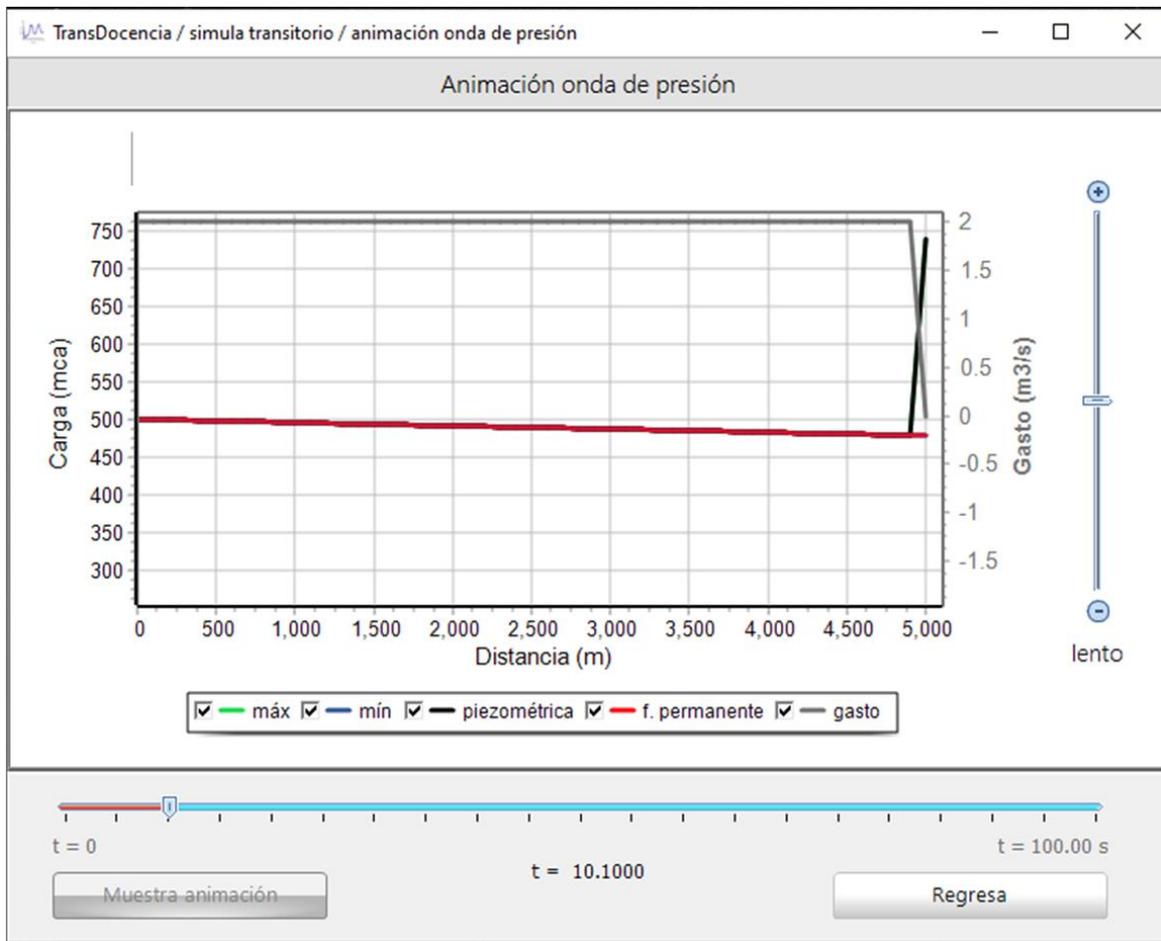


Figura 7.13 Cuando $t = 10.1$ s, la válvula está completamente cerrada, la carga se incrementa y el gasto se hace cero inmediatamente aguas arriba de la válvula. Se genera una onda de alta presión que se propaga hacia el embalse

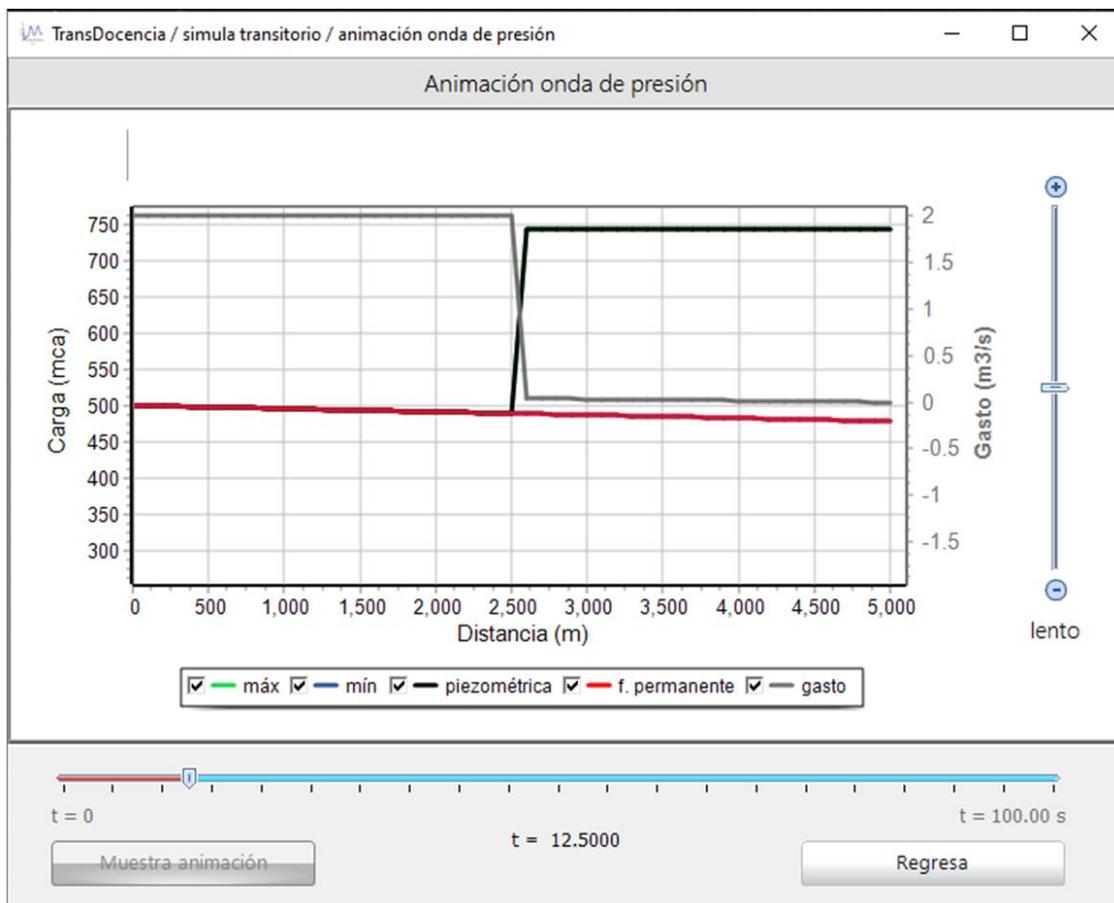


Figura 7.14 A los 12.5 s de la simulación, 2.5 s después de haber cerrado la válvula, la onda ya recorrió 2500 m, la tubería sujeta a sobrepresión entre las posiciones 2500 m y 5000 m

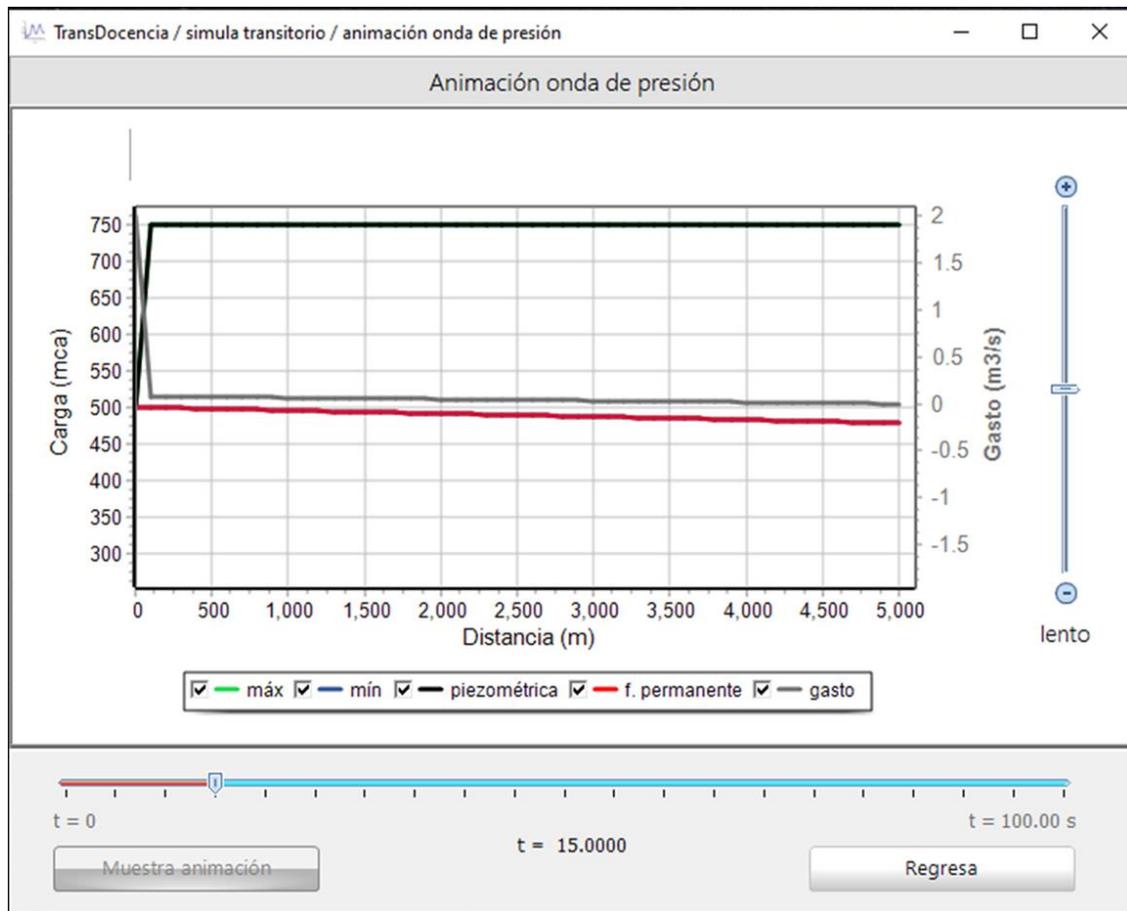


Figura 7.15 En $t = 15.0$ s, han transcurrido 5 s de haber cerrado la válvula. La onda de alta presión ha recorrido los 5 km de tubería con una celeridad de 1000 m/s e incide en el embalse, toda la tubería está sometida a sobrepresión, el gasto es casi cero

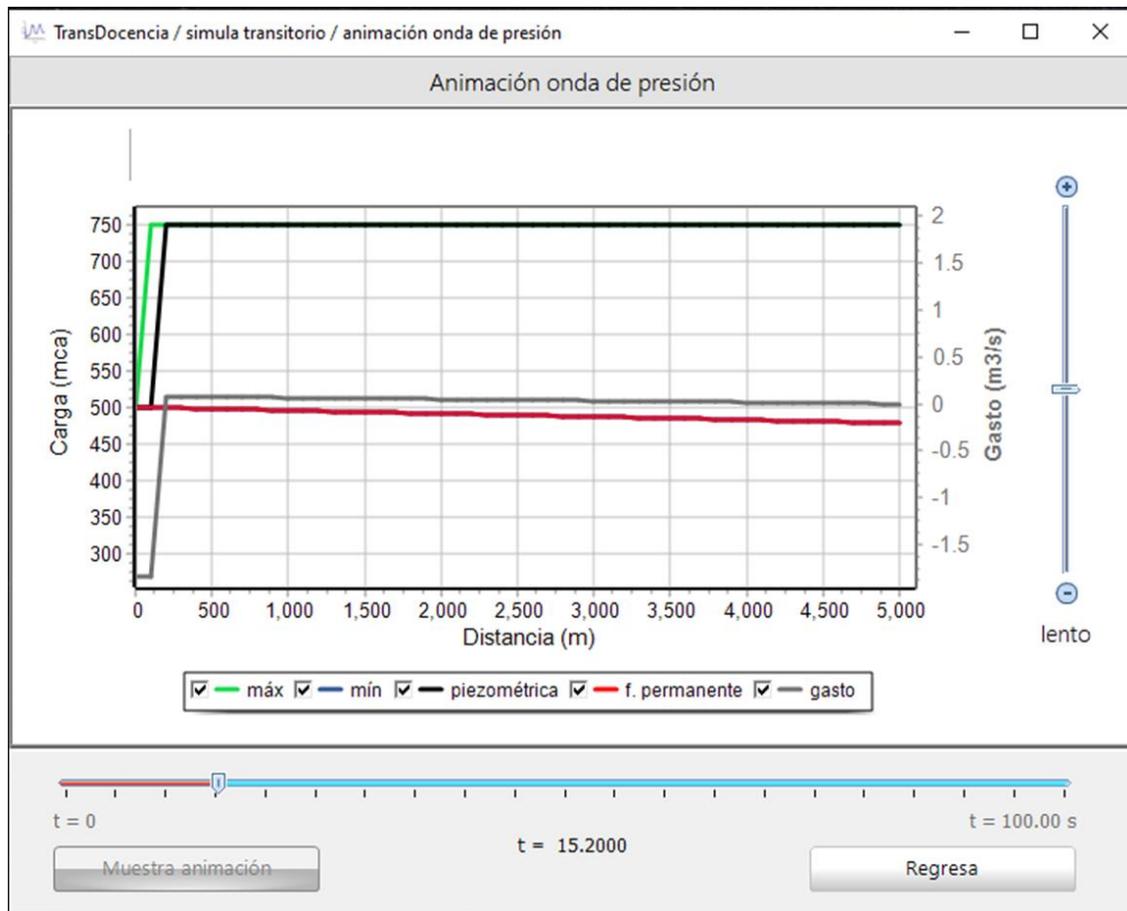


Figura 7.16 En $t = 15.2$ s, han transcurrido 5.2 s de haber cerrado la válvula. La onda de alta presión, que incidió en el embalse cuya carga es constante e igual a 500 mca (se dice que es un nodo de presión), se refleja como una onda de baja presión. Se observa en color verde la "huella" de la presión máxima que dejó la onda de alta presión. El gasto aumenta, pero en sentido inverso

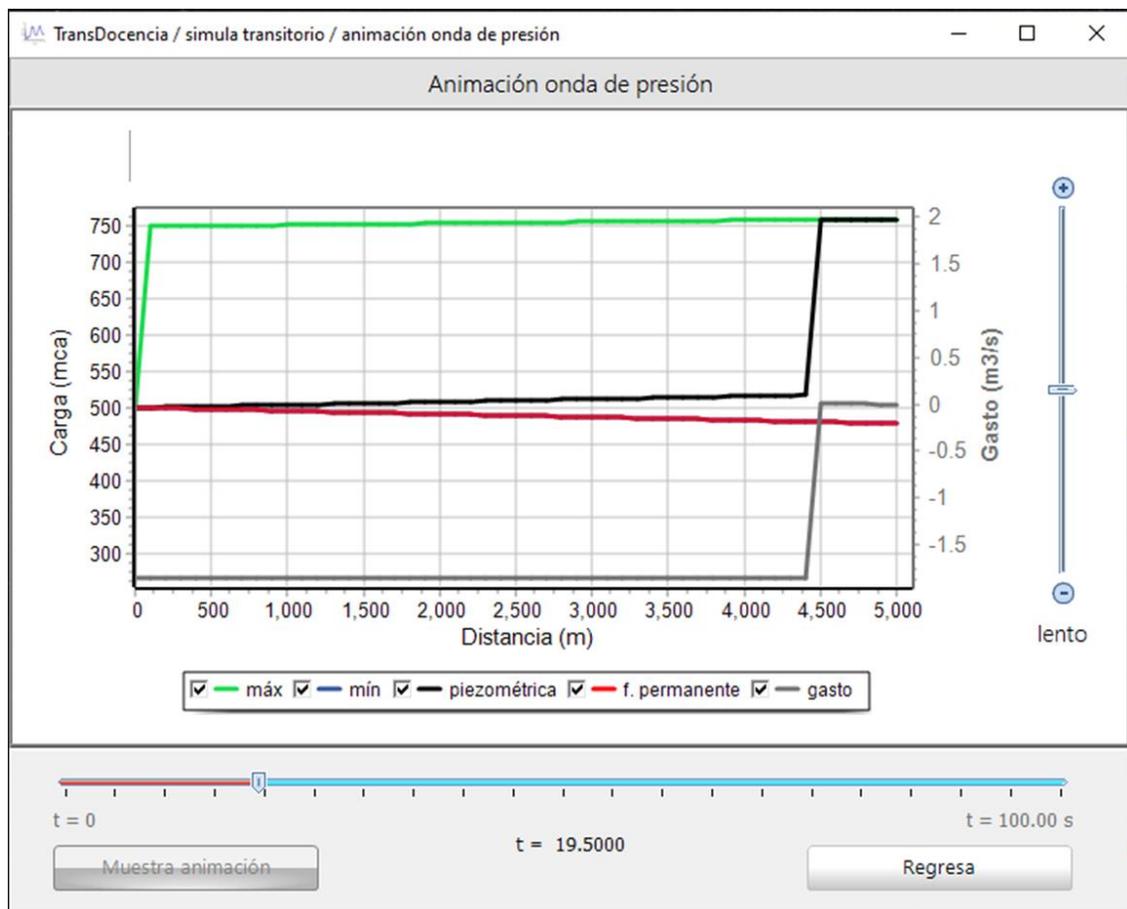


Figura 7.17 En $t = 19.5$ s, después de 4.5 s de haber salido la onda de baja presión del embalse, ésta ha recorrido 4500 m de tubería (recordar que la celeridad es 1000 m/s). En esos 4500 m, la carga piezométrica se acerca a la que había en flujo estable, el gasto se ha incrementado, pero ahora en sentido inverso al de flujo permanente

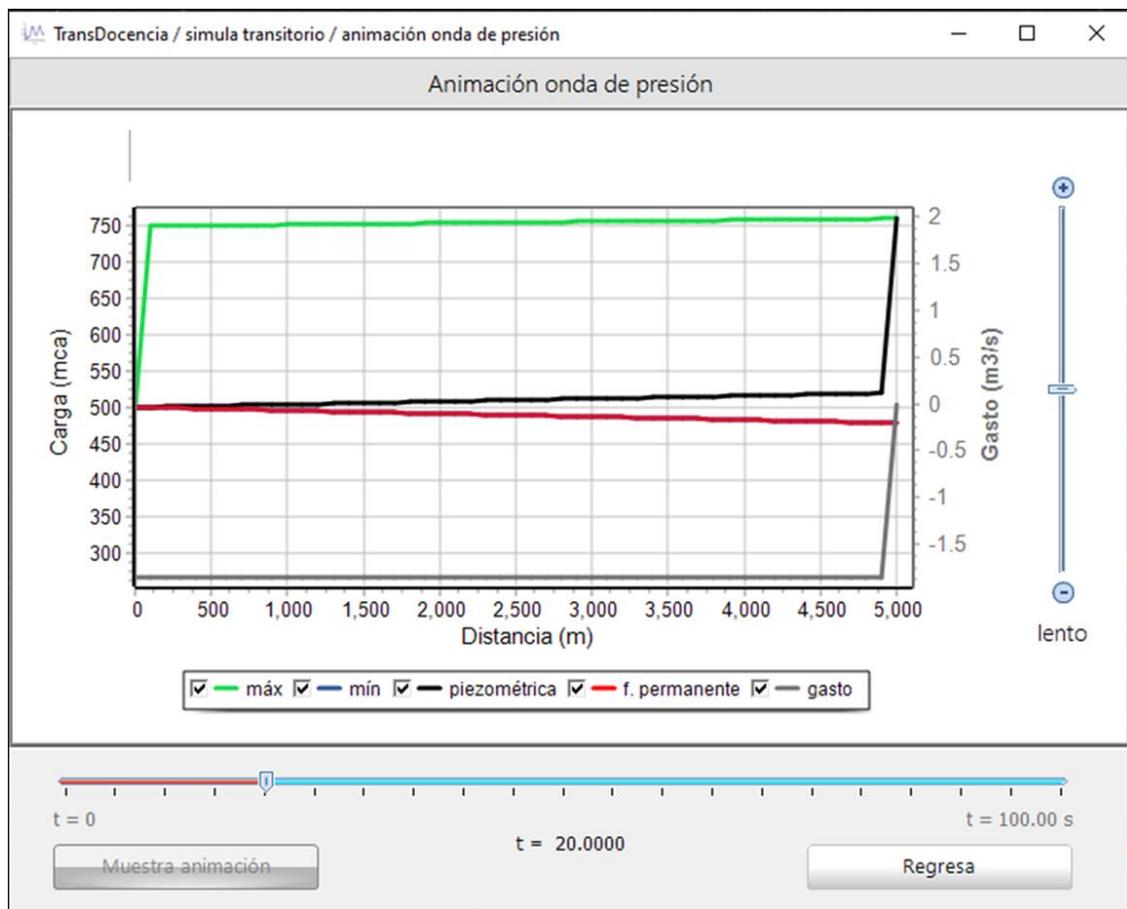


Figura 7.18 En $t = 20.0$ s, han transcurrido 10.0 s de haber cerrado la válvula. La onda de baja presión arriba a la válvula cerrada. Se establece en casi toda la tubería una carga "similar" a la de flujo permanente y un gasto en sentido inverso. Se observa en color verde la "huella" de la presión máxima que dejó la onda de alta presión

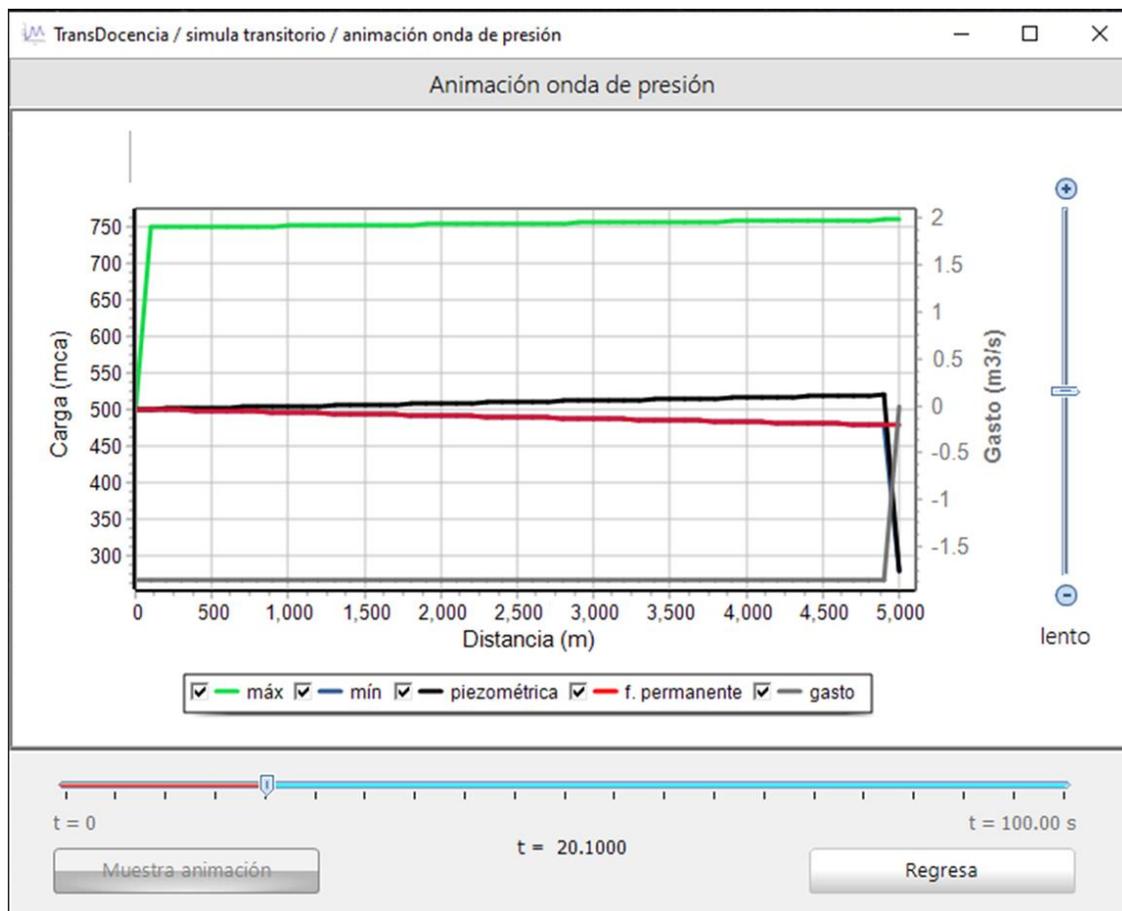


Figura 7.19 En $t = 20.1$ s, después 10.1 s de haber cerrado la válvula, la onda de baja presión se refleja en la válvula como otra onda de baja presión

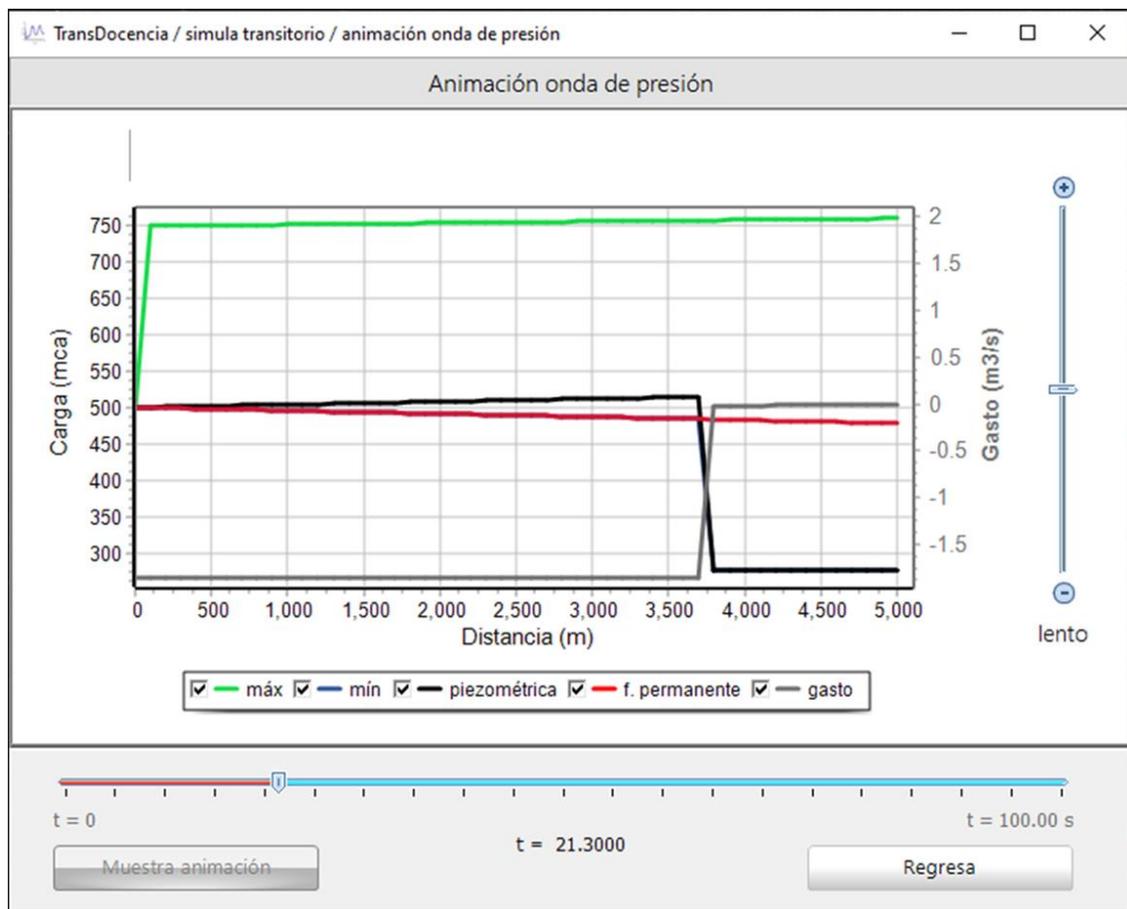


Figura 7.20 En $t = 21.3$ s, después 11.3 s de haber cerrado la válvula, la segunda onda de baja presión (que tiene 1.3 s de vida, por así decirlo) se propaga en dirección de la válvula al embalse, ha recorrido a partir de la válvula 1300 m de tubería, ese tramo de tubería está en subpresión con gasto nulo

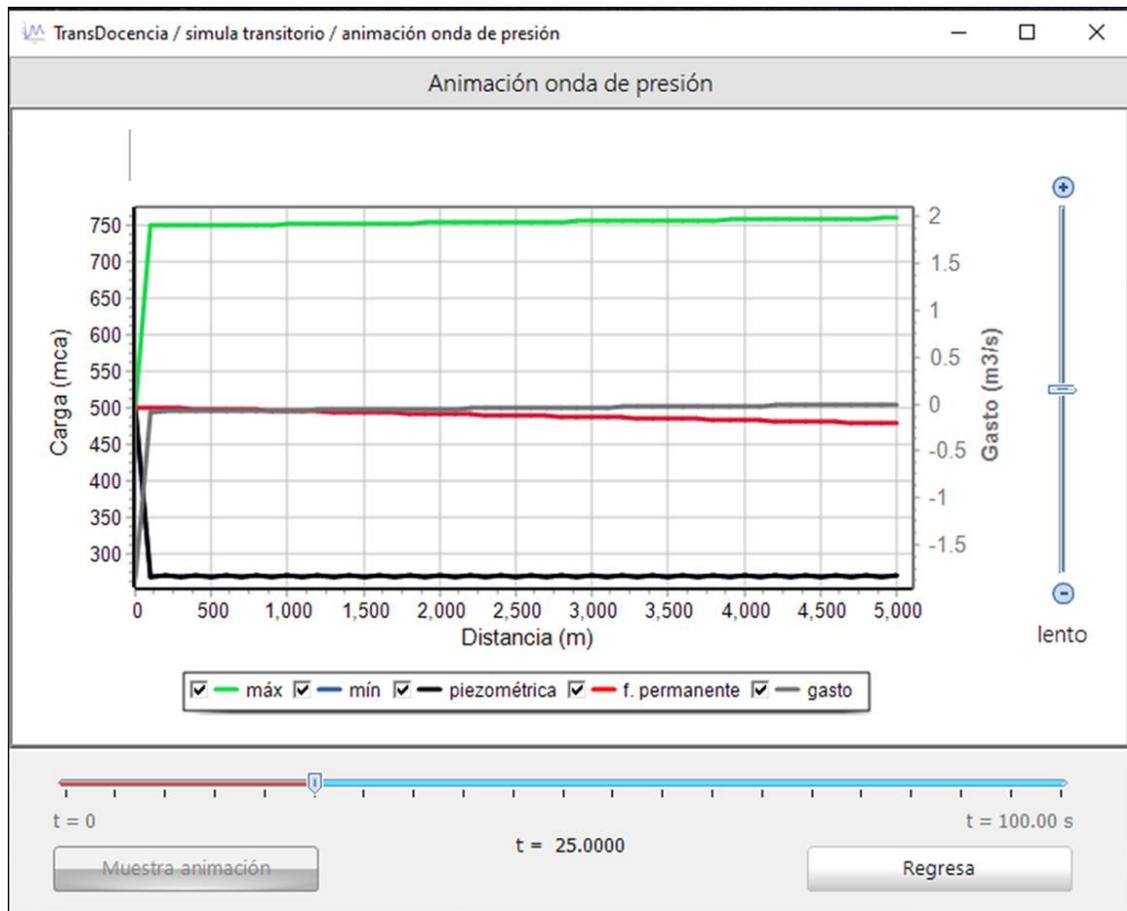


Figura 7.21 En $t = 25.0$ s, después 15.0 s de haber cerrado la válvula, la segunda onda de baja presión incide en el embalse de carga constante

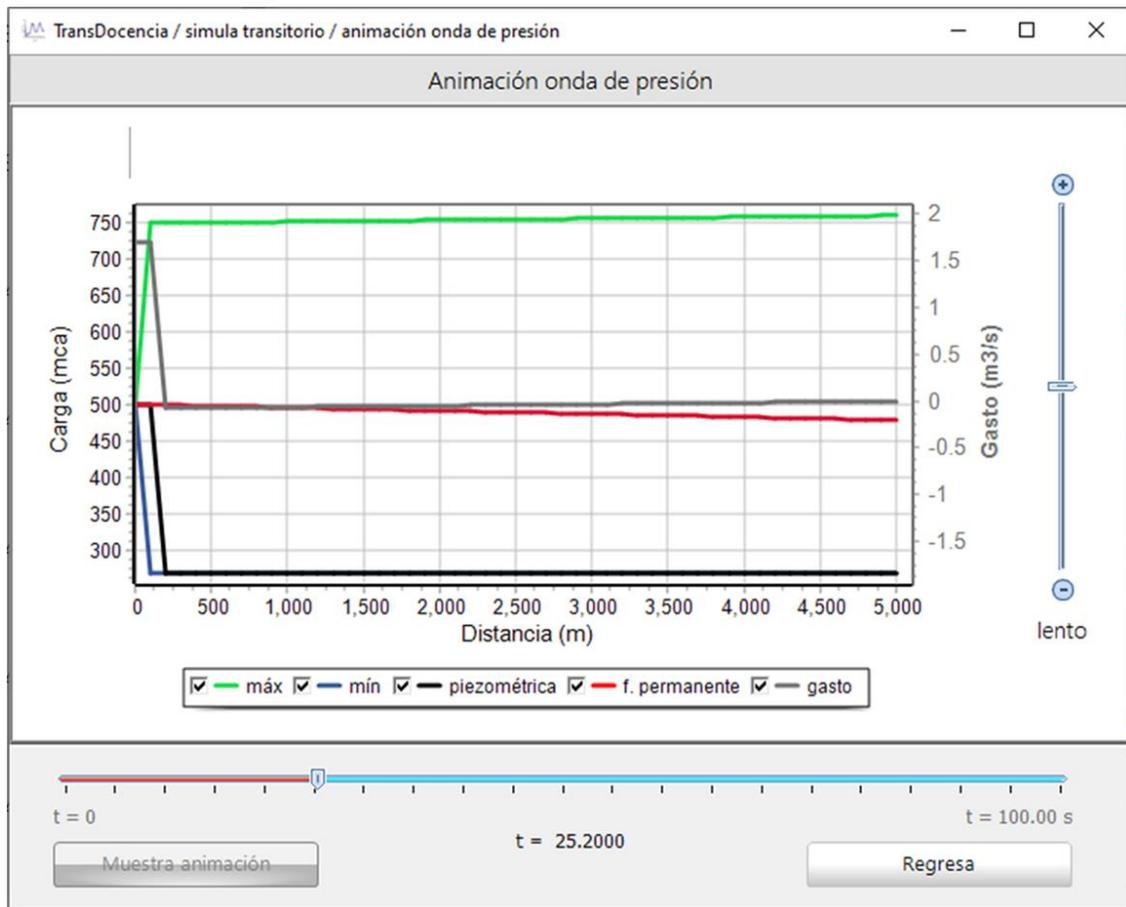


Figura 7.22 En $t = 25.2$ s, después 15.2 s de haber cerrado la válvula, la segunda onda de baja presión se refleja en el embalse de carga constante como una onda de alta presión. Se observa en color azul fuerte la "huella" de la presión mínima que dejó la segunda onda de baja presión

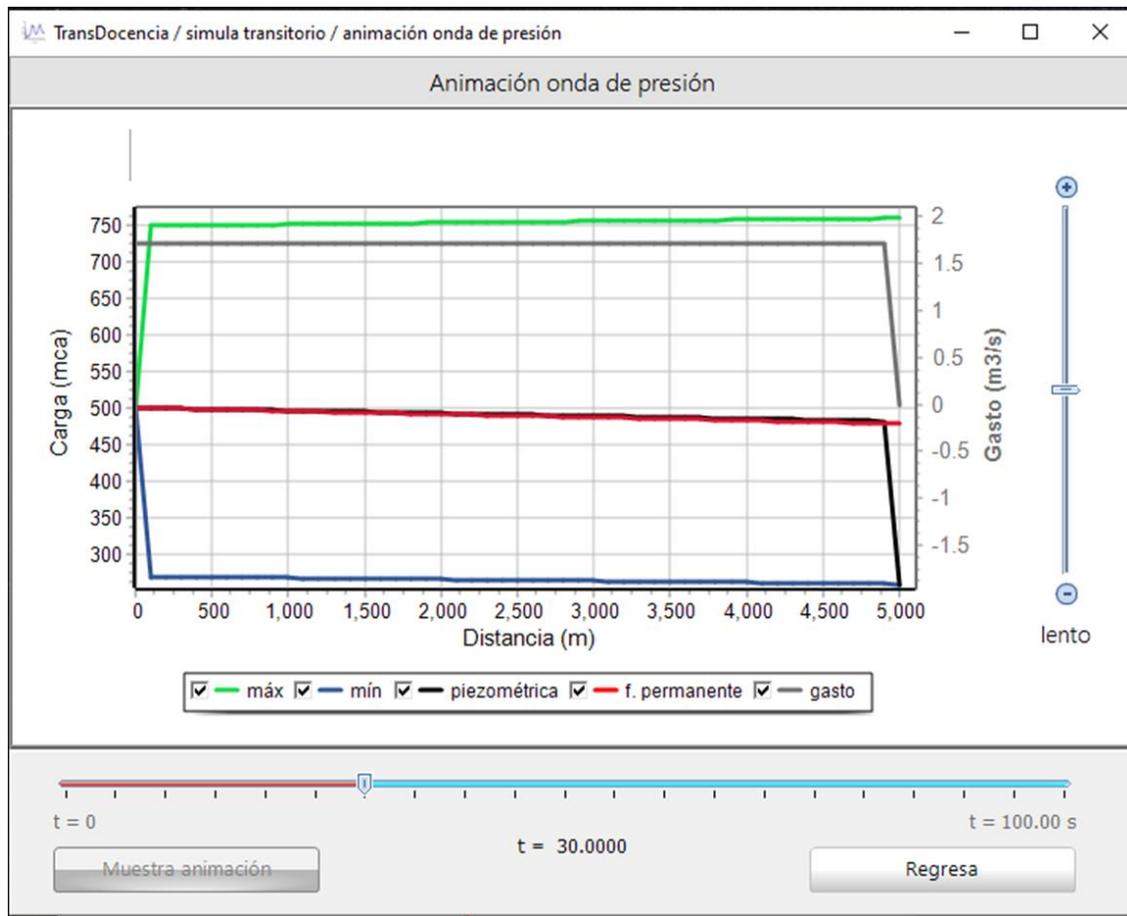


Figura 7.23 En $t = 30.0$ s, después 20.0 s de haber cerrado la válvula, la segunda onda de alta presión incide en la válvula cerrada. Esta onda de presión impuso una carga similar a la de flujo permanente, el sentido del gasto es positivo con un valor menor al de flujo estable

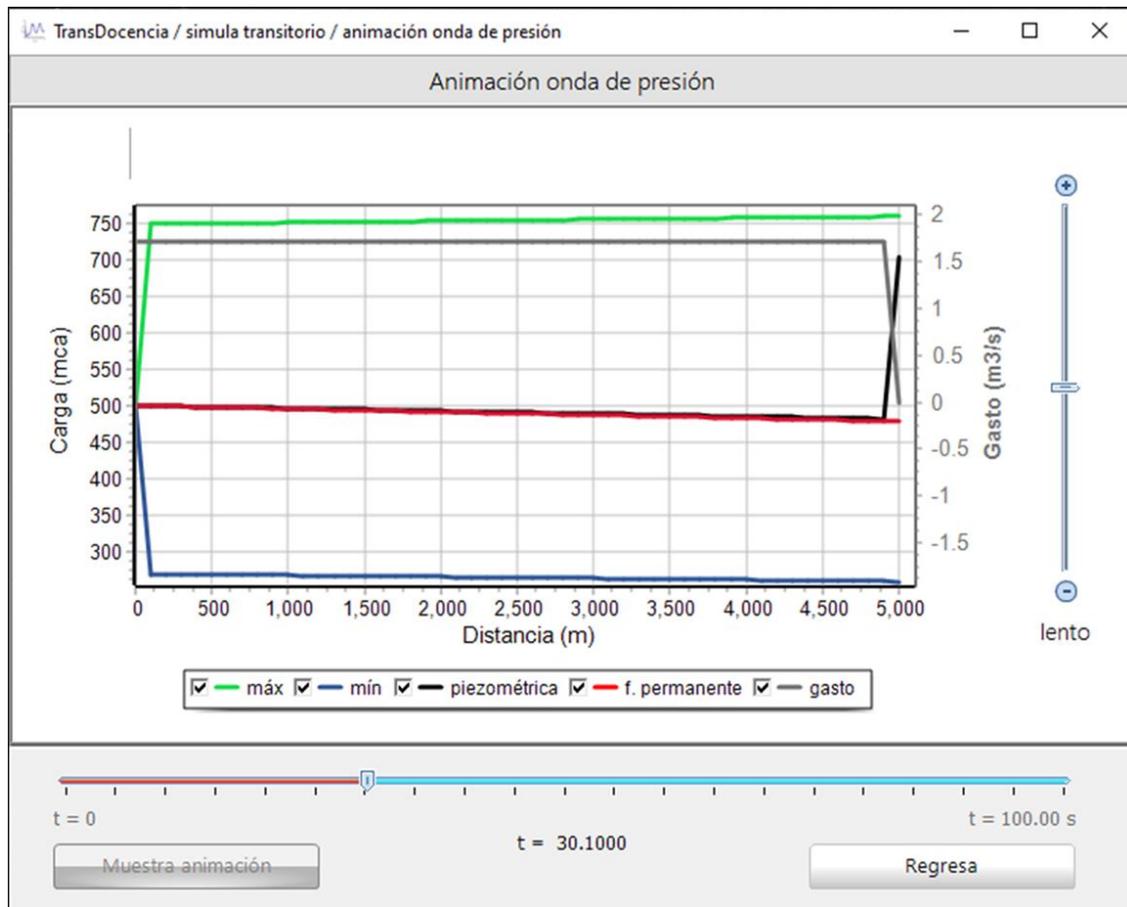


Figura 7.24 En $t = 30.1$ s, a los 20.1 s de haber cerrado la válvula, la segunda onda de alta presión se refleja en la válvula cerrada como una onda de alta presión. Inicia otro periodo o ciclo de la onda de presión, ver Figura 7.13

7.1.2 Piezométricas máximas y mínimas

Las cargas piezométricas máximas y mínimas obtenidas en el periodo de simulación se observan seleccionando *Piezométricas máximas y mínimas* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9), la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 7.25.

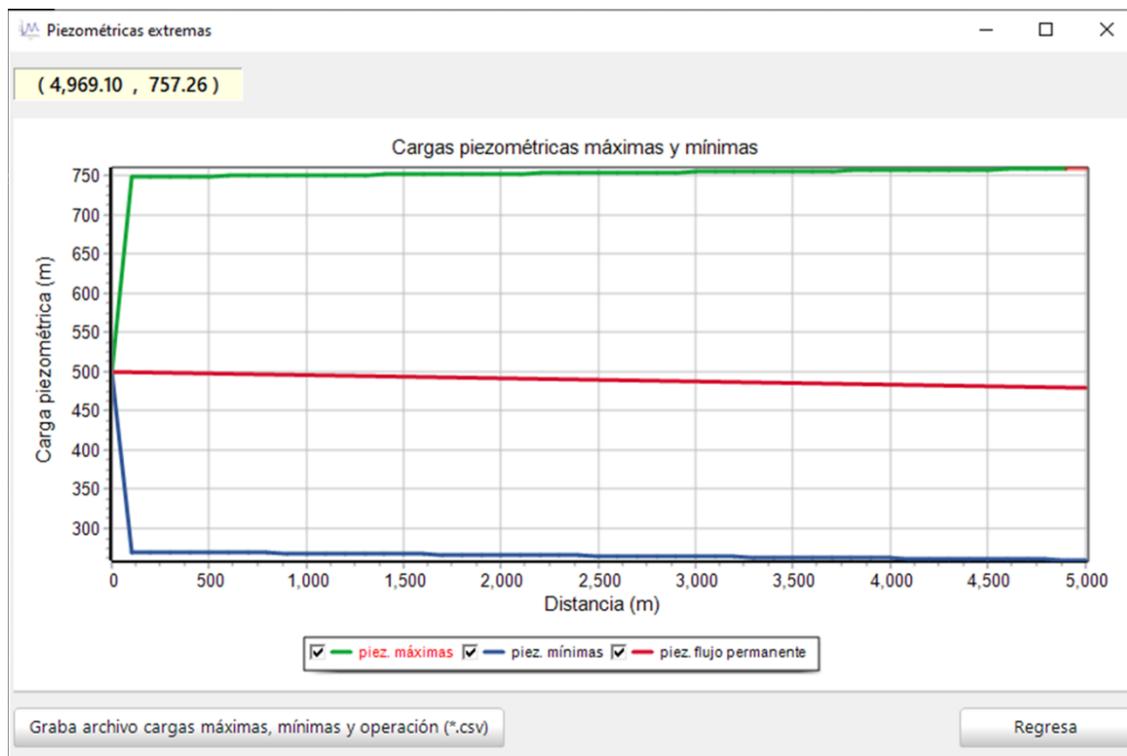


Figura 7.25 Cargas máximas y mínimas obtenidas en el periodo de simulación

7.1.3 Cargas

Las cargas obtenidas en diferentes sitios de la conducción se analizan a través del botón *Cargas* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9). Para mostrar cómo se solicita información de carga y gasto en un sitio determinado de la conducción, el tramo de tubería de longitud 5000 m se dividió en dos tramos de 2500 m, los cuales se unen a través del ícono Cambio de tramo, en las propiedades del ícono se indica que se graben la carga y el gasto, como se muestra en la Figura 7.26.

La pantalla que se despliega con el botón *Cargas* se muestra en la Figura 7.27. La elección de la gráfica se hace a través de las pestañas que llevan el nombre de las estructuras y elementos que se les dio cuando se creó el sistema, las cuales se muestran en las Figuras 7.27 a 7.30. Estas gráficas proporcionan los valores de las cargas y el momento en que se presentó esa carga, a diferencia de la Figura 7.25 que no proporciona información acerca del tiempo.



Figura 7.26 Para grabar la carga y el gasto en un sitio de la conducción en donde no hay estructuras hidráulicas, bombas ni válvulas, se solicita a través del elemento "Cambio de tramo"

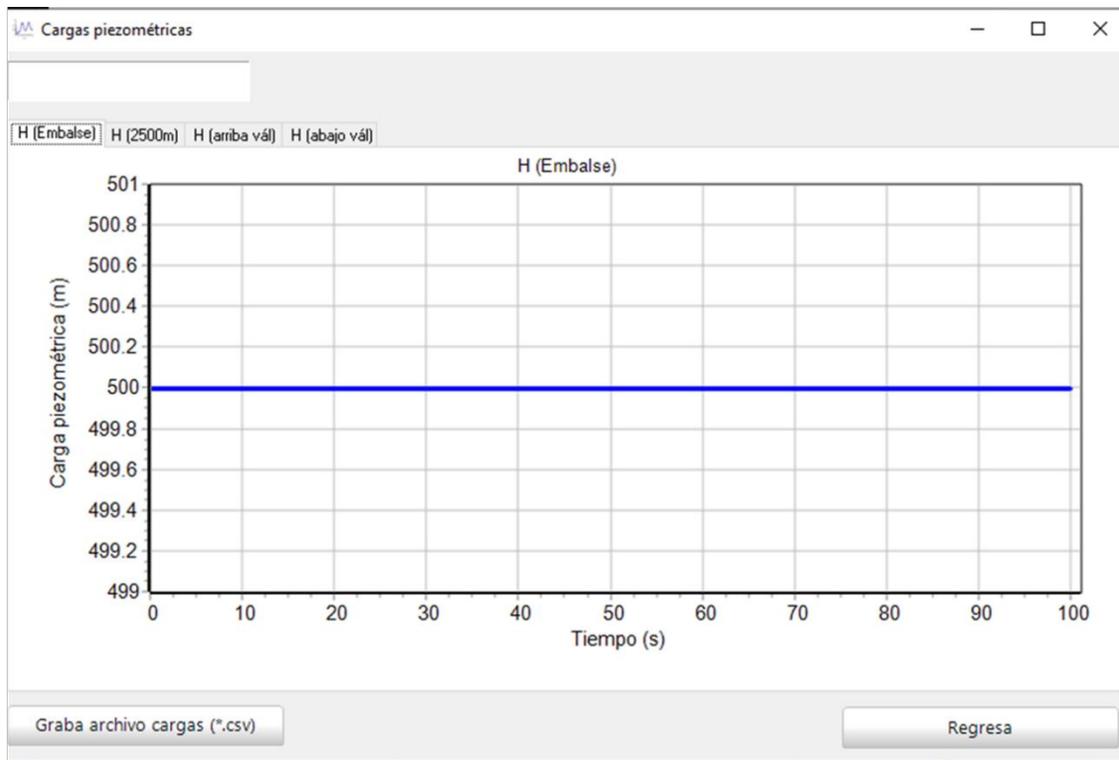


Figura 7.27 El embalse tiene una carga constante igual a 500 m

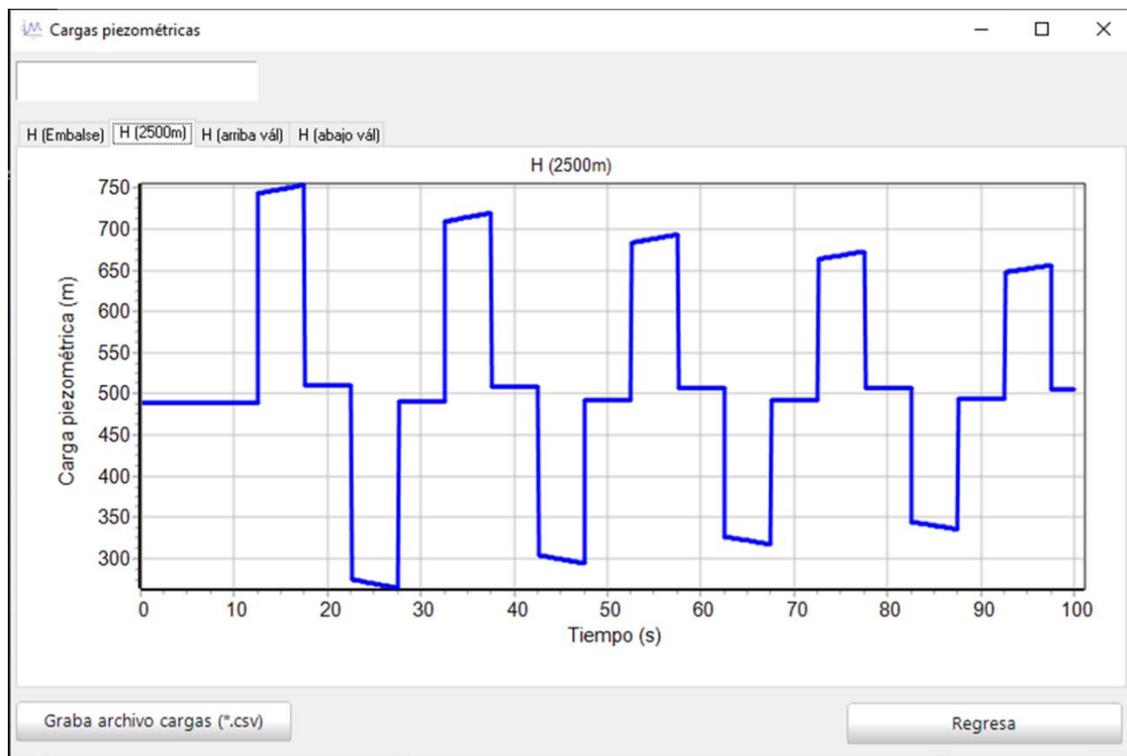


Figura 7.28 Carga a 2500 m tanto del embalse como de la válvula. A los 12.5 s de la simulación, 2.5 s después de haber cerrado la válvula, se presenta el primer incremento de presión, lo que coincide con lo mostrado en la Figura 7.14

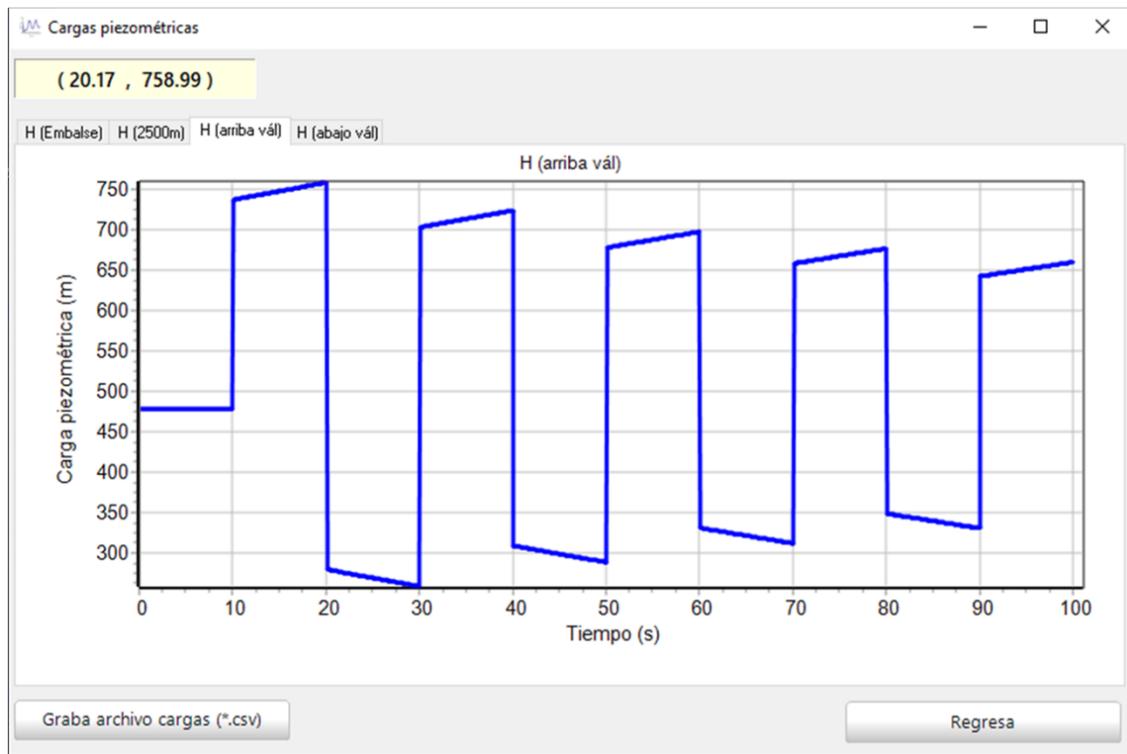


Figura 7.29 Carga inmediatamente aguas arriba de la válvula. En $t = 10.1$ s, la válvula ya cerró de manera instantánea, la carga alcanza un valor aproximado de 740 m (ver Figura 7.13). En el cuadro amarillo, en la parte superior izquierda se lee que en $t = 20.0$ s la carga es de 760.66, comparar este dato con la Figura 7.18

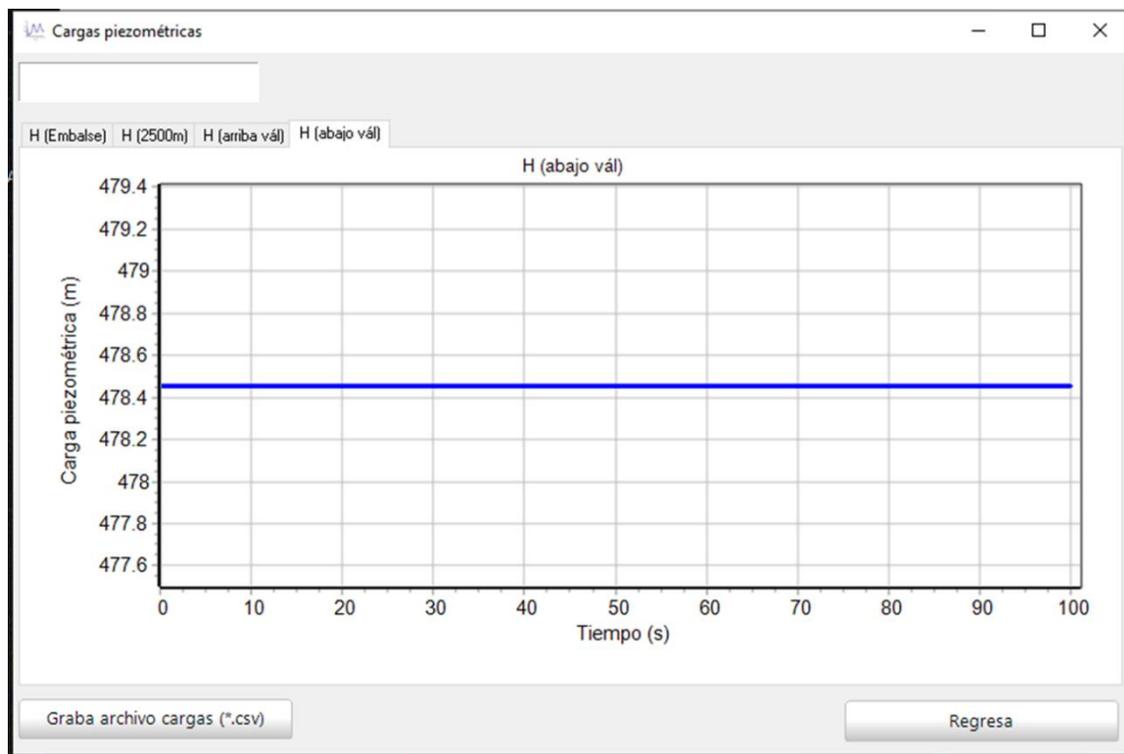


Figura 7.30 Carga inmediatamente aguas abajo de la válvula. Se considera una carga constante igual a la establecida en flujo permanente, la cual se obtiene a través de la ecuación de la energía

7.1.4 Gastos

Al seleccionar *Gastos* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9), se tiene acceso a las gráficas de las Figuras 7.31 a 7.33.



Figura 7.31 Gasto en la conducción en la sección inmediatamente aguas abajo del embalse. En $t = 15.2$ s, después de 5.1 s de haber cerrado la válvula, la onda de alta presión se refleja en el embalse, gasto es igual a $-1.84 \text{ m}^3/\text{s}$, ver Figura 7.16

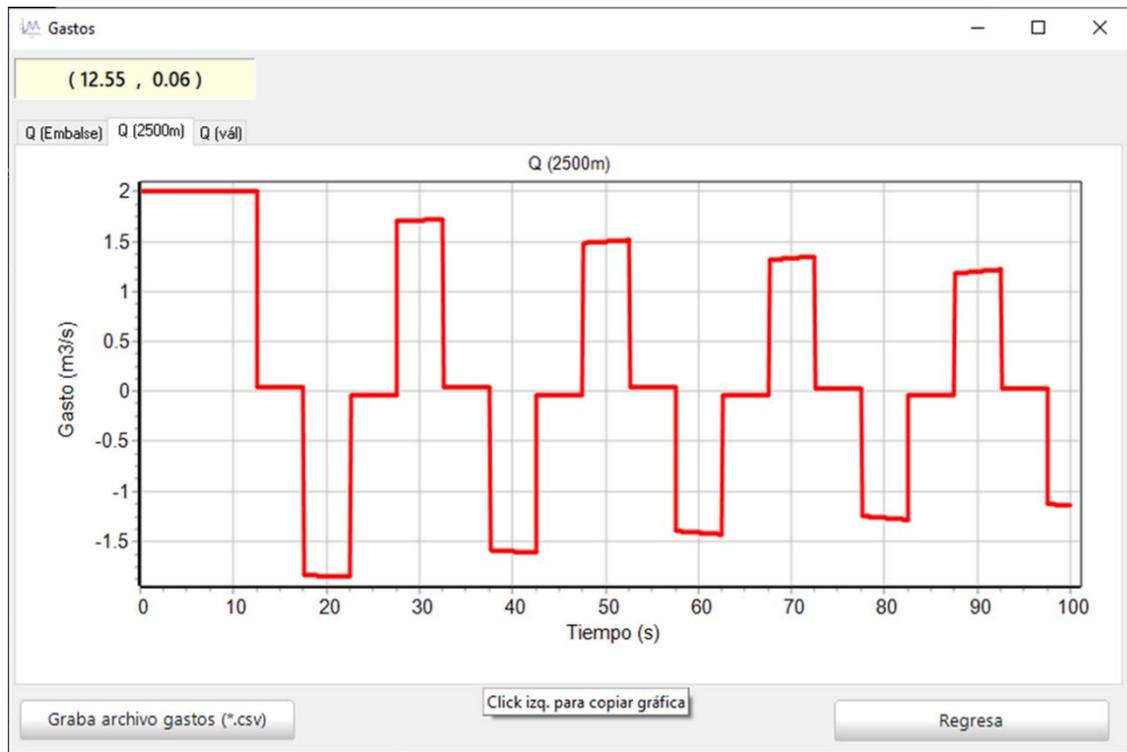


Figura 7.32 Gasto en la mitad de la conducción. En el cuadro superior izquierdo se indica que en $t = 21.3$ s (11.3 s después de haber cerrado la válvula) en la sección de la tubería a 2500 m del embalse el gasto es de -1.85 m³/s, comparar con la Figura 7.20

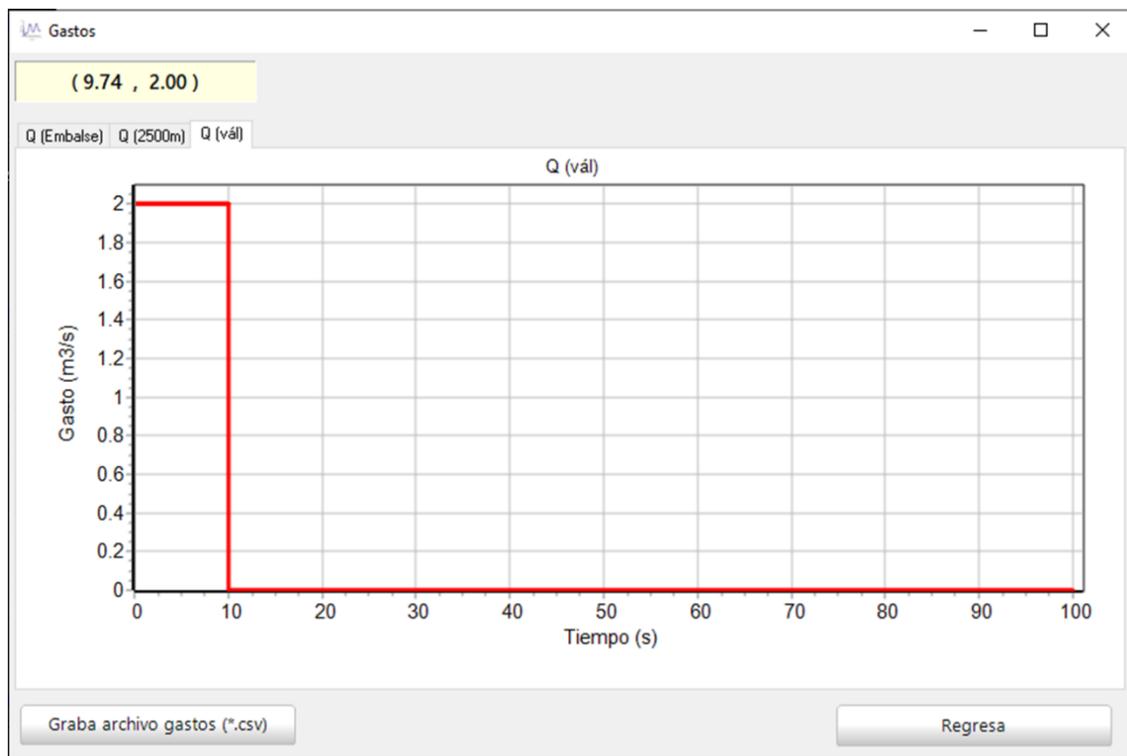


Figura 7.33 Gasto en la conducción inmediatamente aguas arriba de la válvula. La válvula cierra instantáneamente, comienza a cerrarse a los 10 s de la simulación, a partir de 10.10 s el gasto es cero porque la válvula permanece cerrada

7.1.5 Reporte de la simulación

En las Figuras 7.33 se muestra la información que contiene el reporte de la simulación. En el panel de la izquierda se reporta información del flujo permanente, las cargas en los extremos inicial y final de cada tramo de la conducción y el gasto. En el panel de la derecha se muestra información de la operación en flujo transitorio, las cargas máximas y mínimas en los extremos de los tubos o tramos que forman la conducción.

En la Figura 7.35 se muestra la parte inferior del reporte. En la primera línea se indica el nombre del archivo, dato muy útil porque con éste se verifica que los resultados analizados correspondan al arreglo hidráulico y la maniobra en estudio. Las siguientes líneas describen el sistema hidráulico, la dimensión de la malla del método de las características e información de los flujos estable y transitorio.

Reporte de la simulación

Condiciones de operación en flujo estable

Gasto y cargas piezométricas en los extremos de cada tubo

Cargas máximas y mínimas en los extremos de cada tubo

Tubo	Cadenam. inicio tubo	H ags arriba (m)	H ags abajo (m)	Q (m3/s)	Extremo aguas arriba				Extremo aguas abajo			
					H_máx (m)	H_mín (m)	H_máx (m)	H_mín (m)	H_máx (m)	H_mín (m)		
1	0.000	500.000	489.259	2.000	500.000	500.000	753.774	264.601	753.774	264.601	759.138	259.300
2	2,500.000	489.259	478.517	2.000								

Figura 7.34 Parte superior del reporte

ARCHIVO DE DATOS C:\LCP\MANUAL TRANSDOCENCIA SERIES II\ejemplo 1 cierre de válvula ags

Número de tramos: 2
 Núm. de iteraciones para grabar resultados: 1
 Periodo de simulación: 100.000 s

TIPO DE FRONTERA AGUAS ARRIBA: TANQUE DE CARGA CONSTANTE (Embalse)

Cadenamiento del tanque: 0.0000 m
 Elevación de la superficie libre del agua: 500.0000 m

TUBO	LONGITUD	DIAMETRO	CELERIDAD	FACT. FRICC.	GASTO
1	2500.000	1.000	1000.000	0.0130	2.0000

Tramo aguas abajo: 2

TUBO	LONGITUD	DIAMETRO	CELERIDAD	FACT. FRICC.	GASTO
2	2500.000	1.000	1000.000	0.0130	2.0000

DATOS DE LA VÁLVULA QUE CIERRA EN LA FRONTERA AGUAS ABAJO vál

Tiempo de cierre: 0.01 s
 Inicio del movimiento de la válvula: 10.00 s
 Posición de la válvula en flujo permanente: 0.00 °
 (0° => cerrada, 90° => abierta):
 Coeficiente mínimo de pérdida: 0.014873 s2/m5

Coeficientes del polinomio para simular el cierre de la válvula

7.622750 -42.677510 141.553800 -247.456100 204.606300 -63.649000 0.000000

RUTAS PARA ESCRIBIR PIEZOMÉTRICAS

Ruta 1
 Cadenamiento inicial 0.000
 Tubos que forman la conducción: 1 2

Graba reporte (*.txt)

Figura 7.35 Segmento de la parte inferior del reporte

7.2 Ejemplo 2. Oscilación de masa usando el modelo de oscilación de masa

La Figura 7.36 es un esquema típico de una central hidroeléctrica, cuando cambia la apertura de la válvula se produce un transitorio hidráulico. Cuando la válvula cierra en un intervalo de tiempo menor que $2L_2/a$ se dice que se trata de un cierre rápido. En el caso de un sistema como el de la Figura 7.36, el transitorio que se produce es el resultado de la superposición de un transitorio por oscilación de masa y uno de golpe de ariete. En el tramo 1, el transitorio más relevante es el de oscilación de masa. En el tramo 2, el transitorio que predomina es el golpe de ariete. Debido a que este ejemplo trata sobre oscilación de masa, solo se analizará la oscilación de masa que se presenta en el tramo 1, en donde la columna de agua permanece oscilando durante varios minutos entre el embalse y el pozo de oscilación.

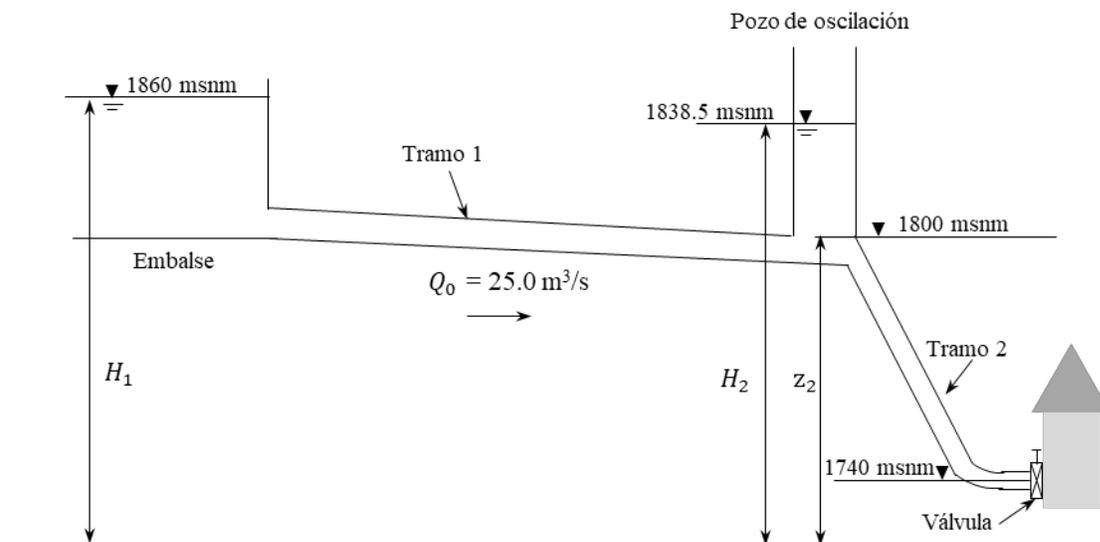


Figura 7.36 Cargas durante el flujo permanente

Consideraciones:

- i) La válvula cierra en 1 s, se trata de un cierre rápido.
- ii) El área transversal del embalse es suficientemente grande de manera que la variación de la carga piezométrica inmediatamente aguas abajo de él sea despreciable durante el tiempo que permanece el transitorio.

Objetivos del ejemplo:

- i) Proponer un diámetro para el pozo para posteriormente, a través de la solución analítica (Ecuación A1.12) del modelo de oscilación de masa, se obtenga y grafique la amplitud de la oscilación del espejo de agua en el pozo.
- ii) Para el mismo pozo, graficar la amplitud de la oscilación del espejo de agua utilizando la solución numérica (ecuaciones A1.18 y A1.19).

En la Tabla 7.1 se muestran las características de la conducción.

Tabla 7.1 Características de la conducción de la Figura 7.36

	Longitud L (m)	Diámetro D (m)	Factor de fricción $f(D-W)$	Gasto de operación (m^3/s)
Tramo 1	2000	2.44	0.018	25
Tramo 2	500	1.80	0.012	25

7.2.1 Solución analítica

Propongamos el diámetro del pozo de oscilación 5 veces el diámetro del tramo 1 de la conducción, es decir $D_T = 12.20$ m. Una vez calculado el diámetro del pozo y aplicando las ecuaciones A1.13 y A1.14 se obtienen la mitad de la amplitud de la oscilación, su frecuencia y el periodo, como se indica en las ecuaciones 7.1, 7.2 y 7.3. En la Tabla 7.2 se indican las áreas transversales del tramo 1, del pozo y la velocidad del agua, datos que se necesitan para aplicar las ecuaciones mencionadas.

Tabla 7.2 Información complementaria para aplicar las ecuaciones A1.13, y A1.14

Área del tramo1 A (m^2)	Área del pozo A_T (m^2)	Velocidad del agua en el tramo 1 v (m/s)
4.68	116.90	5.35

$$M = 5.35 \sqrt{\frac{2000(4.68)}{9.81(116.90)}} = 15.28 \text{ m} \quad (7.1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{9.81(4.68)}{2000(116.90)}} = 0.014 \text{ 1/s} \quad (7.2)$$

$$T = \frac{2\pi}{0.014} = 448.6 \text{ s} \quad (7.3)$$

La ecuación de la oscilación del espejo de agua en el pozo (referida a la carga del embalse) se obtiene sustituyendo M y ω en la Ecuación A1.12, con lo que se obtiene la Ecuación 7.4 cuando se toma la fase igual a cero.

$$u = 15.28 \text{ sen}(0.014 t) \quad (7.4)$$

Para observar una oscilación completa del espejo de agua en el pozo es necesario graficar la función u durante un intervalo de tiempo mayor o igual al periodo de oscilación (T). También es deseable que en la gráfica se muestren los valores máximos y mínimos de la oscilación, para lo cual, la función u debe estimarse para $t = nT/4$, n entero mayor o igual a cero. Como se indica en el Anexo A1, en la solución analítica la amplitud de la oscilación está referida al nivel del espejo del agua en el embalse (1860 msnm), por lo que, la carga en el pozo se obtiene con la Ecuación 7.5, cuya gráfica, calculada con un incremento temporal $dt = \frac{T}{4(4)} = 28.04 \text{ s}$ se muestra en la Figura 7.37.

$$H_2 = 1860 + 15.28 \text{ sen}(0.014 t) \quad (7.5)$$

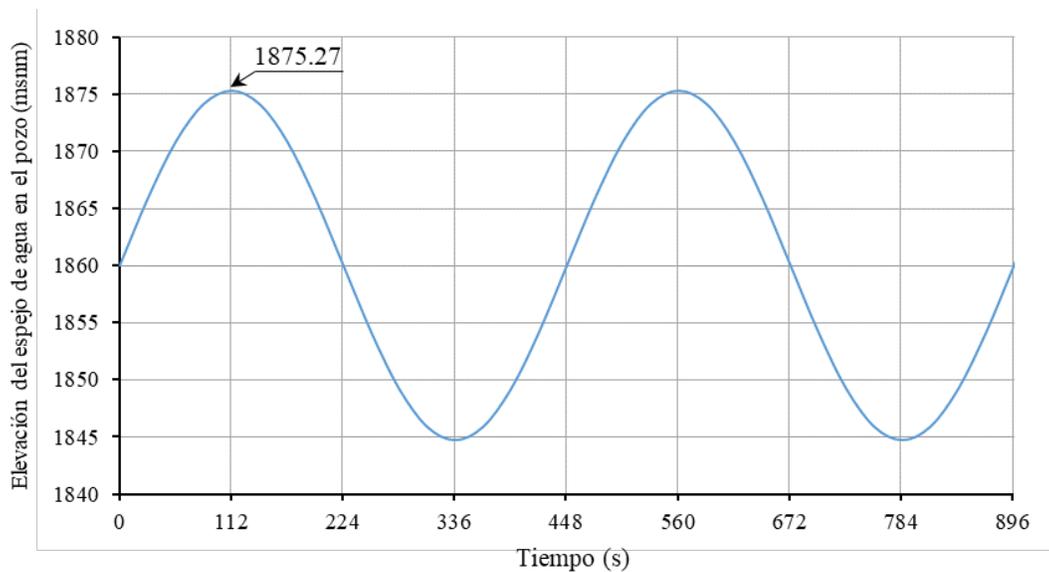


Figura 7.37 Oscilación del espejo de agua en el pozo de oscilación, $h_2 = 1860 + u$

7.2.2 Solución numérica

Para conocer el comportamiento real del pozo se deben considerar las pérdidas en el sistema, por lo que se tienen que utilizar las ecuaciones A1.18 y A1.19, las cuales se presentan en las ecuaciones 7.6 y 7.7 en donde se ha sustituido la variable y por H_2 .

$$H_2(t + \Delta t) = H_2(t) + \Delta t \frac{A}{A_T} v(t) \quad (7.6)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) - \Delta t \frac{f}{2D} v(t)|v(t)| - \Delta t \frac{g}{L} (H_2(t + \Delta t) - h_1) \quad (7.7)$$

Una duda que se presenta es qué incremento de integración Δt es adecuado para aplicar el método de Euler. Una forma para determinarlo es realizar primero los cálculos iterativos con $f=0$ en la Ecuación 7.7, ya que para este caso las soluciones analítica y numérica deben ser iguales.

La Figura 7.38 muestra las oscilaciones obtenidas numéricamente con $\Delta t = 28.04$ s y $\Delta t = 5$ s, cada una de ellas comparada con la solución analítica, el incremento de tiempo adecuado es 5 s porque las soluciones analítica y numérica son iguales. En la Tabla 7.3 se muestran los primeros segundos del cálculo obtenidos en Excel para ambos incrementos, observar que el cálculo inicia con las condiciones del flujo permanente ($t = 0$).

Tabla 7.3 Primeros segundos del cálculo de la oscilación del nivel del agua en el pozo utilizando las ecuaciones 7.6 y 7.7 considerando $f=0$

Incremento de integración $\Delta t = 28.04$ s			Incremento de integración $\Delta t = 5$ s		
t (s)	h_2 (f=0)	v (m/s)	t (s)	h_2 (f=0)	v (m/s)
0.00	1860.00	5.35	0	1860.00	5.35
28.04	1866.00	4.52	5	1861.07	5.32
56.08	1871.07	3.00	10	1862.13	5.27
84.12	1874.43	1.01	15	1863.19	5.19
112.16	1875.57	-1.13	20	1864.22	5.09
140.20	1874.31	-3.09	25	1865.24	4.96
168.24	1870.84	-4.58	30	1866.23	4.80
196.28	1865.69	-5.37	35	1867.19	4.63
224.32	1859.67	-5.32	40	1868.12	4.43

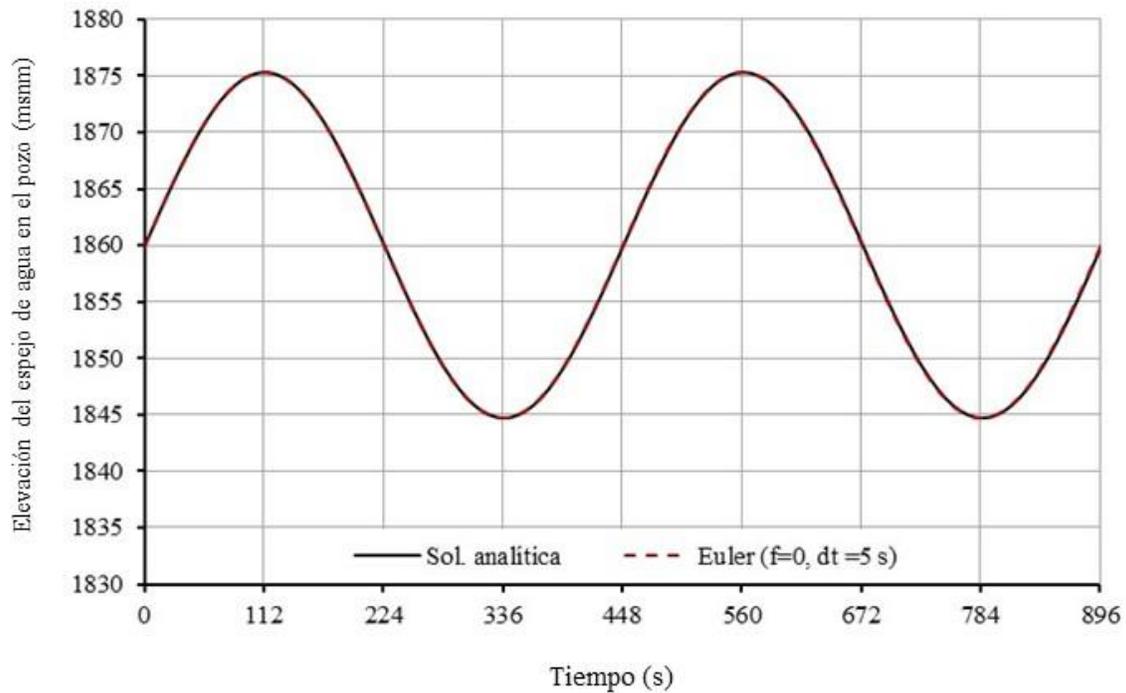
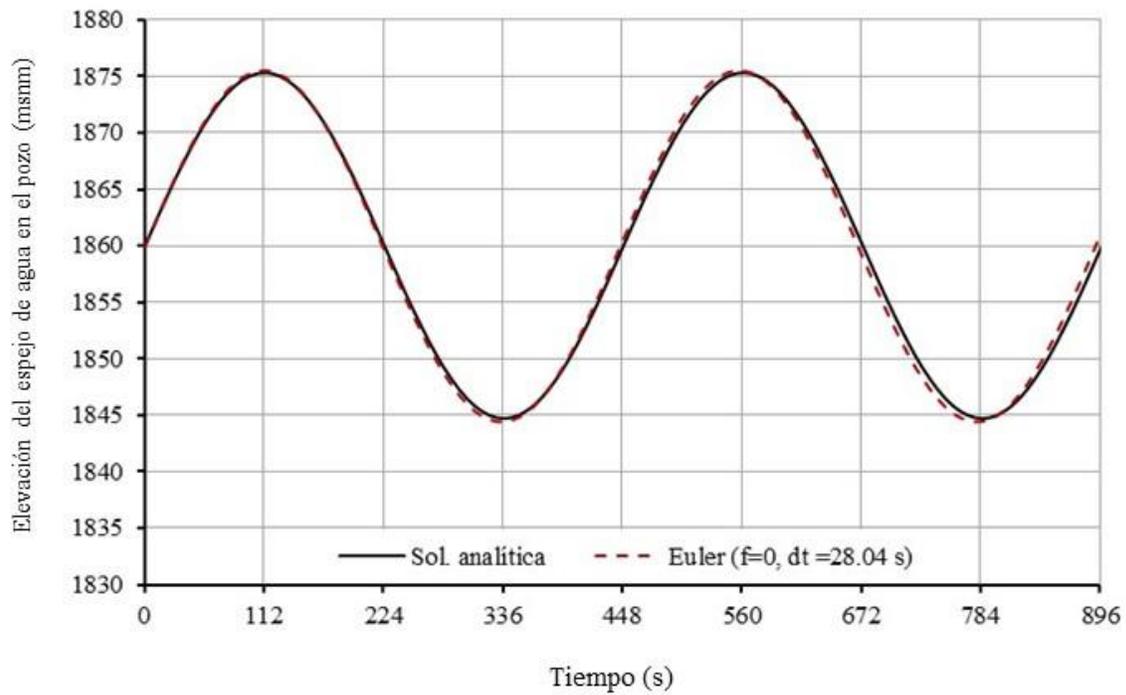


Figura 7.38 Usando el incremento de integración $\Delta t = 28.04$ s las soluciones analítica y numérica (Euler) difieren, por lo que éste se rechaza. Para $\Delta t = 5$ s las soluciones son iguales, por lo que se acepta este incremento de integración

En la Figura 7.39 se muestran las gráficas de la oscilación del espejo de agua en el pozo y la de la velocidad del agua en el tramo 1, cuando la velocidad es cero se presentan los valores máximos y mínimos de la oscilación.

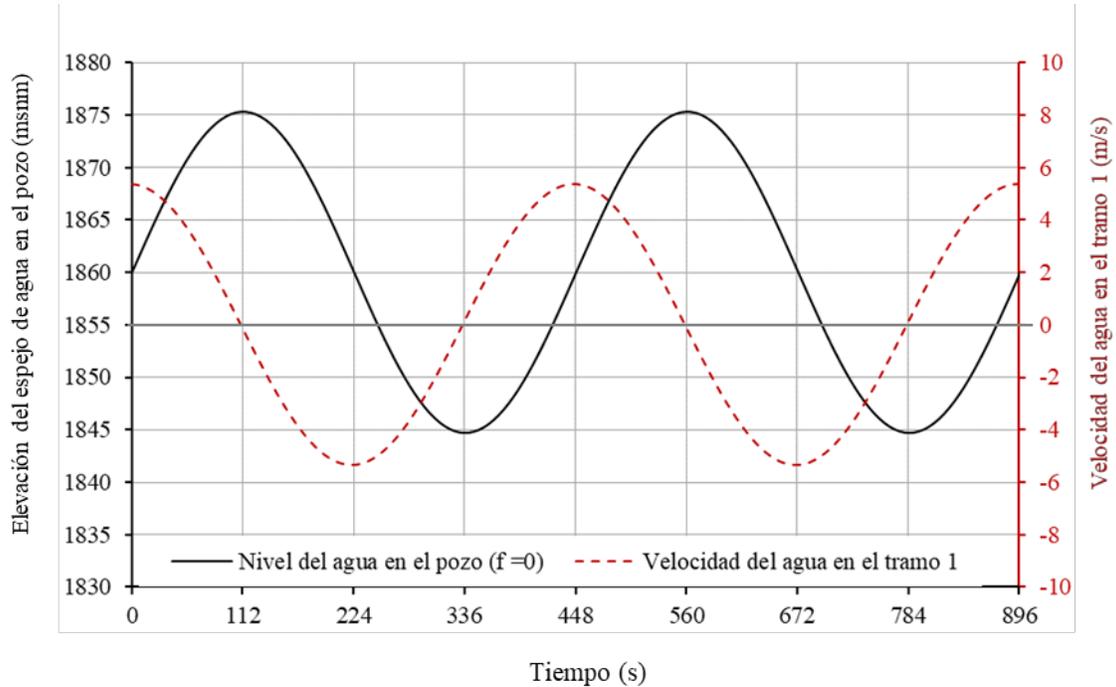


Figura 7.39 Cuando el agua se detiene en el tramo 1 se presentan los valores extremos de la oscilación del agua en el pozo

Una vez determinado el valor del incremento de integración y considerando el factor de fricción indicado en la Tabla 7.1, se obtiene para los primeros segundos de cálculo la Tabla 7.4. En la Figura 7.40, se muestra la oscilación del agua en el pozo.

Tabla 7.4 Primeros segundos del cálculo de la oscilación ($f=0.018$ y $\Delta t=5$ s)

t (s)	H_2 ($f=0.018$)	v (m/s)
0	1838.50	5.35
5	1839.57	5.32
10	1840.64	5.27
15	1841.69	5.21
20	1842.73	5.13
25	1843.76	5.04
30	1844.77	4.95
35	1845.76	4.85

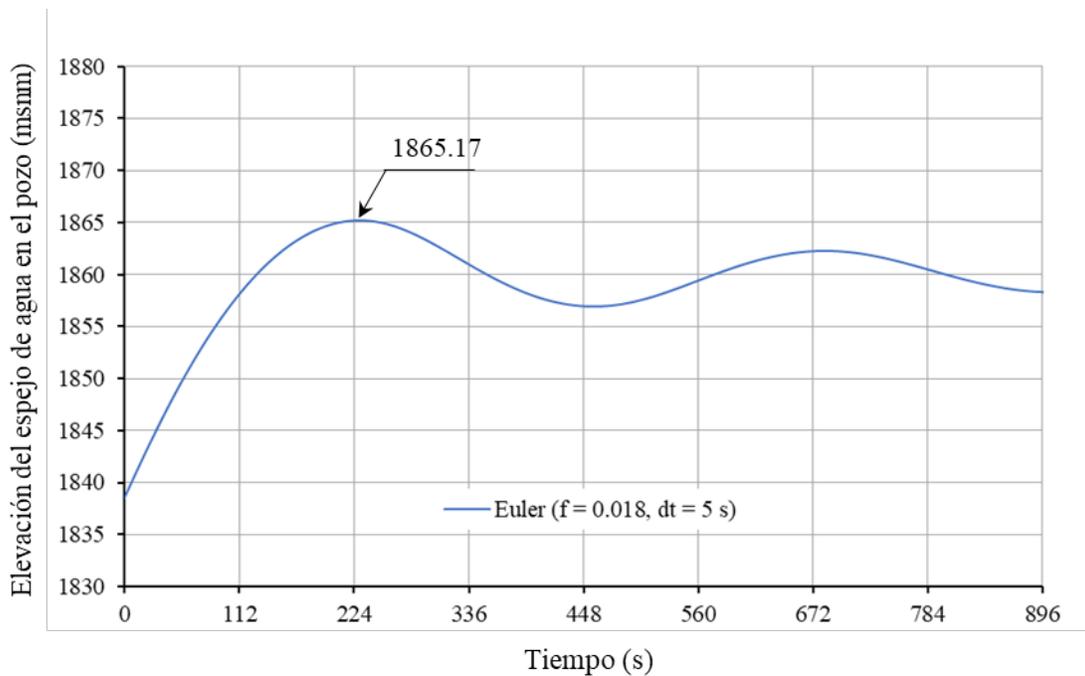


Figura 7.40 Oscilación del nivel del agua en el pozo con área transversal $A_T = 116.90 \text{ m}^2$ y factor de fricción 0.018 obtenida con la solución numérica

Al comparar las Figuras 7.38 y 7.39 se observa cómo el sistema pierde energía debido a la fricción.

7.3 Ejemplo 3. Simulación del transitorio generado por el cierre de una válvula ubicada en la frontera aguas abajo de la conducción

El ejemplo consiste en analizar con TransDocencia el transitorio del sistema del Ejemplo 2 cuando la válvula cierra en un segundo.

El transitorio se describe con el modelo de tubería elástica y fluido compresible o modelo de golpe de ariete descrito con las ecuaciones A2.4 y A2.5 cuya solución se obtiene con el método de las características (Sección A2.2); la condición de frontera aguas arriba (tanque de carga constante) descrito con la Ecuación A2.18 donde H_p es la carga en el tanque; la condición de frontera aguas abajo (válvula que cierra) descrita con la Ecuación A9.7 y la operación del pozo de oscilación descrito por la Ecuación A5.5.

Para simular un pozo o tanque de oscilación se necesita proporcionar sus dimensiones, área y altura. Se propone un pozo con área igual al del Ejemplo 2, 116.90 m².

La altura del pozo puede proponerse utilizando la solución analítica del modelo de oscilación de masa (caso sin fricción) o a través de la solución numérica (caso con fricción).

Determinación de la altura del pozo utilizando la solución analítica (sin fricción).

Observando la Figura 7.41 se plantea la Ecuación 7.8

$$z_{pozo} = H_1 + M - z_2 \quad (7.8)$$

donde

z_{pozo} es la altura del pozo de oscilación, en m

H_1 es la carga en el embalse ($f = 0$), en msnm

M es la mitad de la amplitud de la oscilación de agua en el pozo (Ecuación 7.1), en m

z_2 es la cota de desplante del pozo de oscilación, en msnm

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación 7.8, se obtiene:

$$z_{pozo} = 1860 + 15.28 - 1800 = 75.28 \text{ m} \quad (7.9)$$

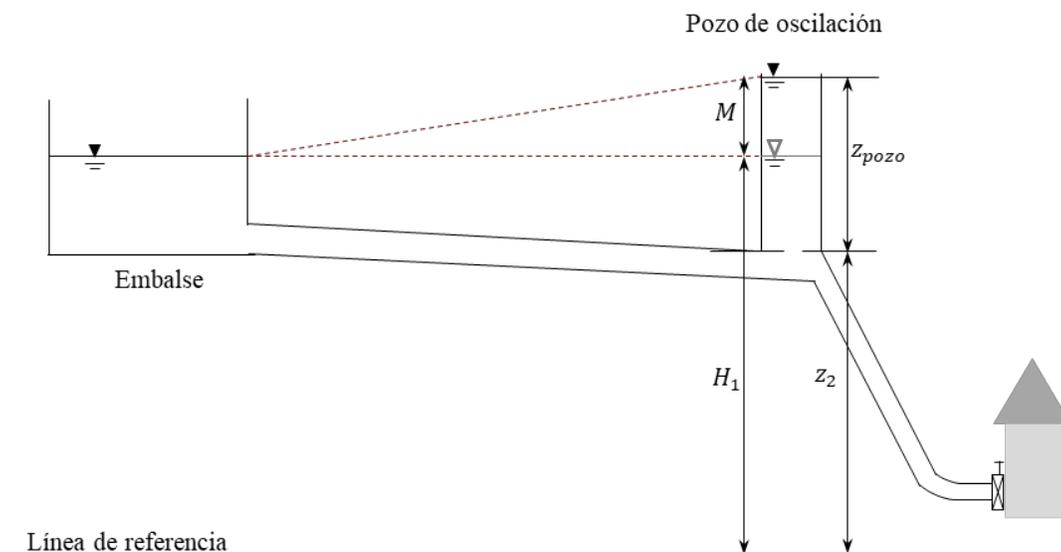


Figura 7.41 Cálculo de la altura del pozo (z_{pozo}) a partir de la solución analítica

Determinación de la altura del pozo utilizando la solución numérica (con fricción).

En este caso, primero se resuelve el modelo de oscilación de masa (Sección 7.2.2). Con los resultados obtenidos, la altura del pozo se determina restando a la elevación máxima del espejo del agua (1865.17 msnm, ver Figura 7.41) la elevación de la cota de desplante del pozo (1800 msnm, ver Figura 7.36), la altura del pozo será:

$$Z_{\text{pozo}} = 1865.17 - 1800.00 = 65.17 \text{ m} \quad (7.10)$$

Lo interesante de determinar la altura del pozo utilizando la solución analítica (caso sin fricción) es que ésta se obtiene directamente de la Ecuación 7.1. Además, cuando el intervalo de integración utilizado en la solución numérica (con fricción) no es el adecuado, puede suceder que no se evalúe el valor máximo de la oscilación (nivel máximo que alcanza el agua en el pozo) entonces, el pozo no tendrá la altura suficiente para evitar derrames. Si durante la simulación del transitorio el agua derrama, TransDocencia manda un aviso.

Cabe hacer notar que, tanto para la solución analítica como para la solución numérica, la altura del pozo se obtiene a partir de haber propuesto su área.

Las Figuras 7.41 a 7.47 muestran una sugerencia de la secuencia que puede seguirse para crear el sistema hidráulico de la Figura 7.36.

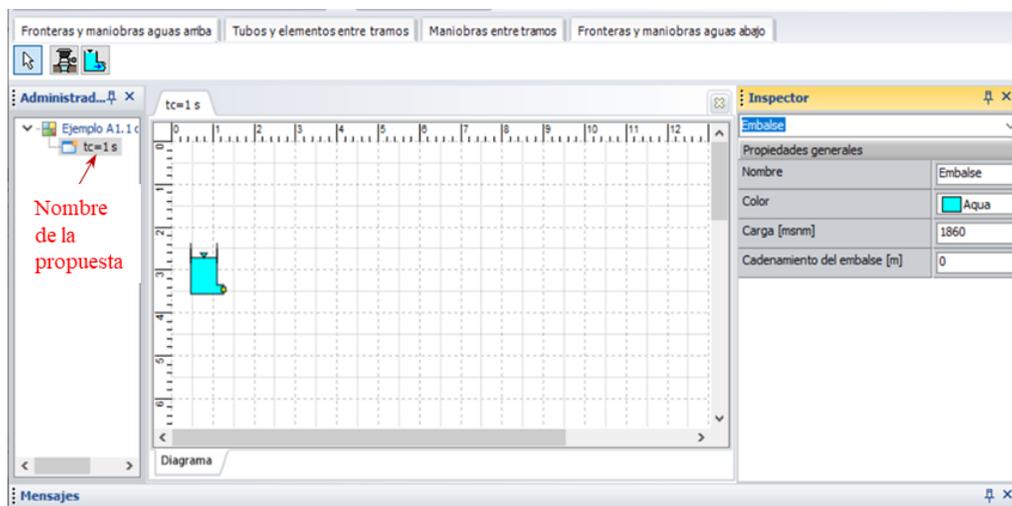


Figura 7.42 Datos del embalse

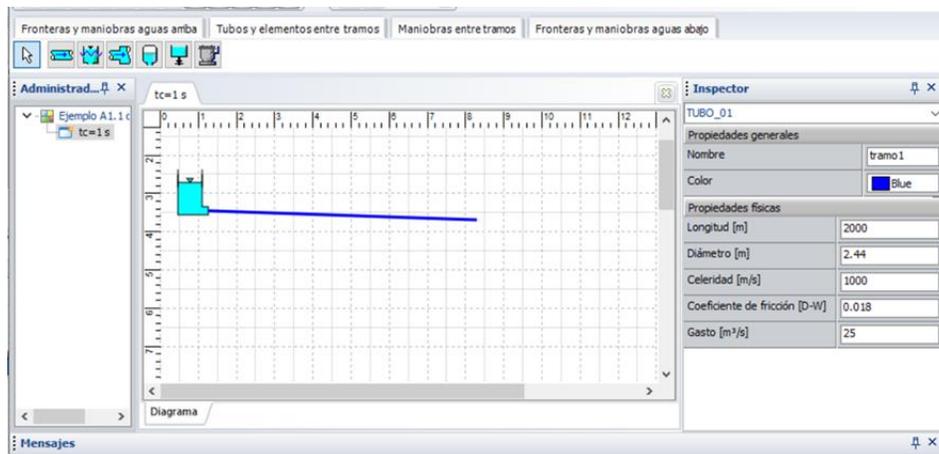


Figura 7.43 Datos del tramo 1

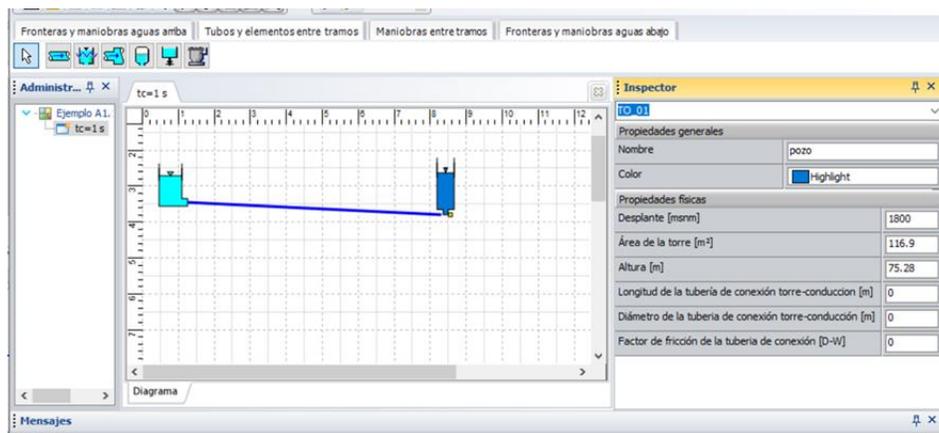


Figura 7.44 Datos del pozo de oscilación

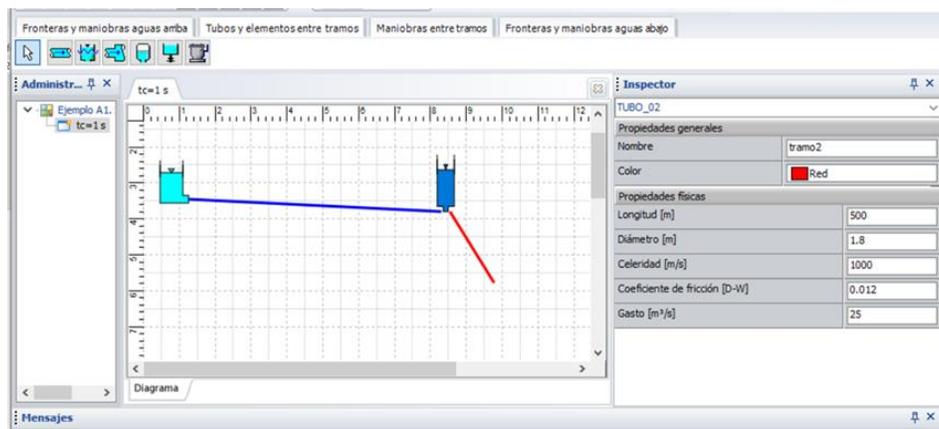


Figura 7.45 Datos del tramo 2

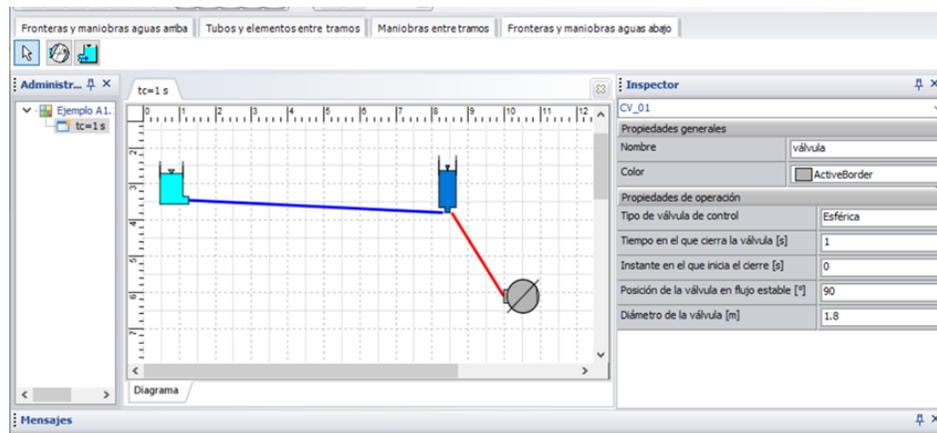


Figura 7.46 Datos de la válvula, en flujo permanente est totalmente abierta. Se simula que el cierre total se realiza en un segundo, a pesar de que en una operación real no puede realizarse en ese tiempo

Cuando todos los elementos del sistema hidráulico estn conectados y todos los datos fueron aceptados en el proceso de validación se abre la pantalla de la Figura 7.47.

Una vez creado el sistema hidráulico, la simulación del transitorio se realiza desde la pantalla principal de TransDocencia, ver Figuras 7.8 a 7.11, al término de la simulación se tiene acceso a las gráficas de resultados a través de los botones del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9), los que se activan cuando se informa que terminó la simulación (Figura 7.11).

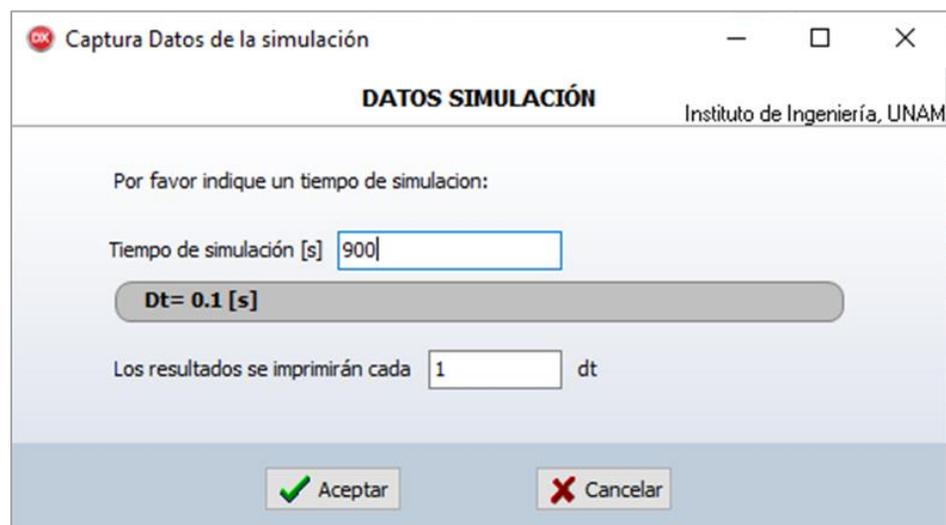


Figura 7.47 El tiempo de cálculo es de 900 s con un intervalo de integración del Método de las Características de 0.1 s, los resultados se grabarán cada intervalo de integración

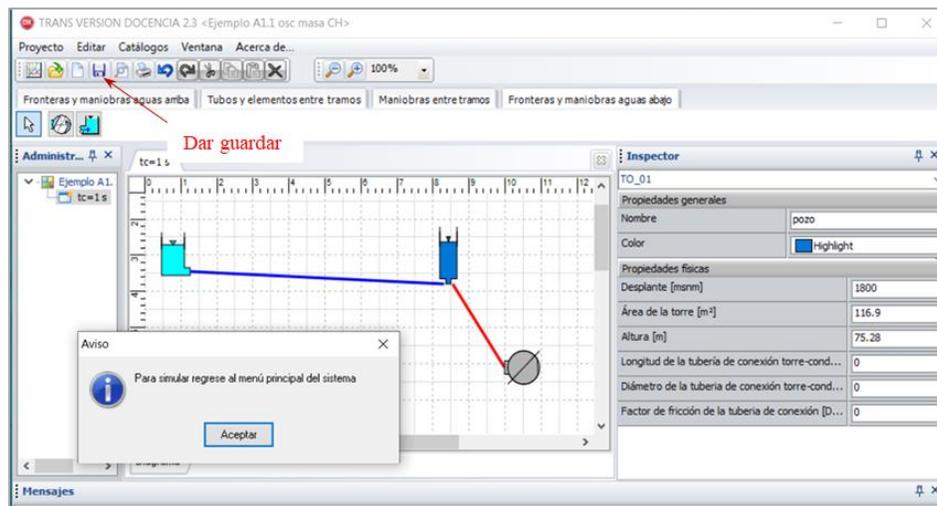


Figura 7.48 Al marcar el ícono del disco, se guarda la propuesta de nombre $t_c = 1$ s, se actualiza el proyecto y se despliega la pantalla de aviso que se muestra

7.3.1 Animación de la onda de presión

Las gráficas de las Figuras 7.48 a 7.52 son gráficas representativas de la animación de la onda de presión, a través de ellas se puede dar seguimiento a la propagación de la onda de presión.

Como se mencionó en el Ejemplo 1, la línea negra representa la carga piezométrica correspondiente al instante que indica el contador de tiempo, la propagación de la onda de presión generada por el golpe de ariete se observa a través de la modificación de esta curva entre cada figura que se presenta.

El cambio en el gasto se muestra con la línea gris, para tener una referencia del incremento y disminución de la presión se muestra la línea de cargas piezométricas en flujo permanente con línea roja, los valores máximos y mínimos de la piezométrica registrados desde el inicio de la simulación hasta el instante de tiempo indicado en cada figura, se muestran en color verde y azul, respectivamente.

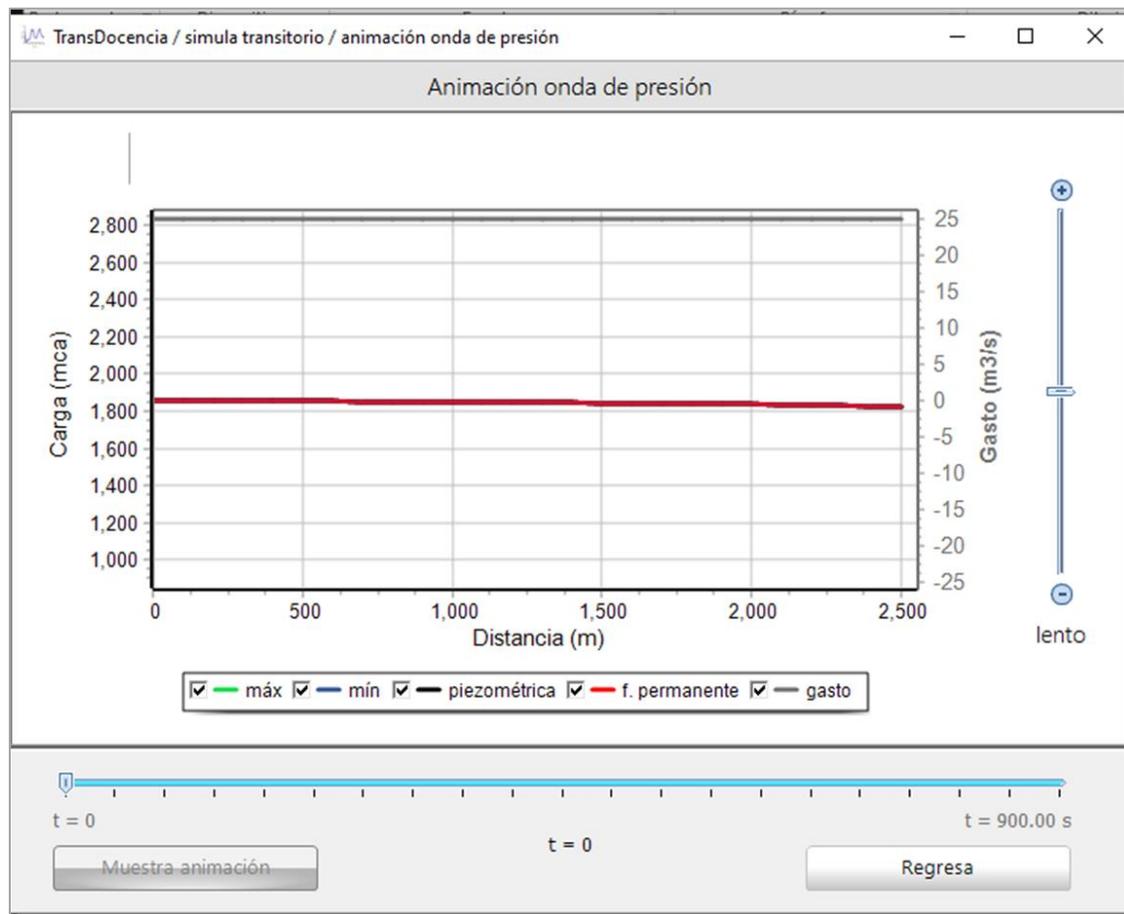


Figura 7.49 Cargas piezométrica y gasto en flujo permanente

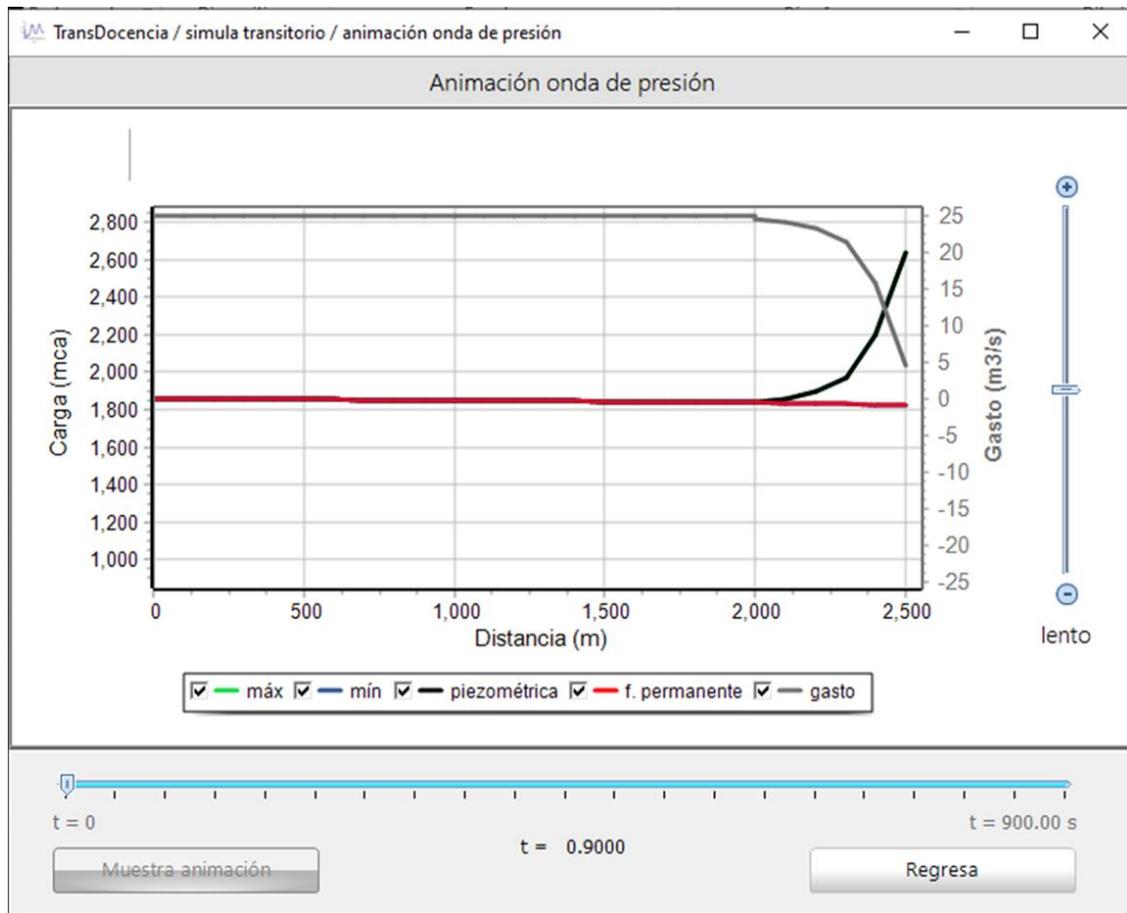


Figura 7.50 En $t = 0.90$ s, se observa el incremento de presión en la tubería de presión y la disminución del gasto debido al cierre de la válvula

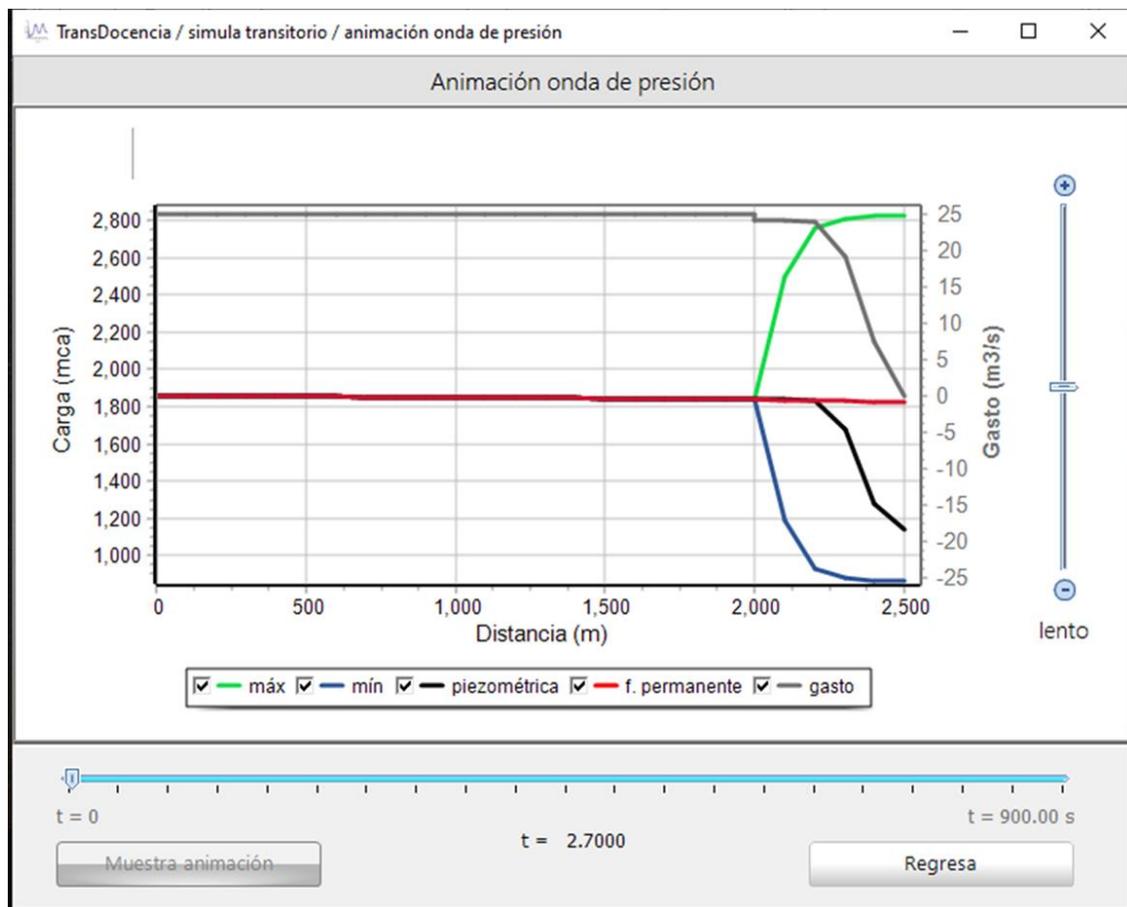


Figura 7.51 Parte de la onda de presión generada por el cierre rápido de la válvula, se refleja en el pozo de oscilación y parte se transmite. En $t = 2.70$ s, la onda de presión ha recorrido 5 veces el tramo 2 (la tubería de alta presión), se observan con líneas de color verde y azul los valores máximos y mínimos de la carga que se han presentado durante ese intervalo de tiempo. La onda transmitida, incidió en el embalse y se reflejó, la onda reflejada ha recorrido 200 m del tramo 1, tanto en la carga como en el gasto los cambios son pequeños

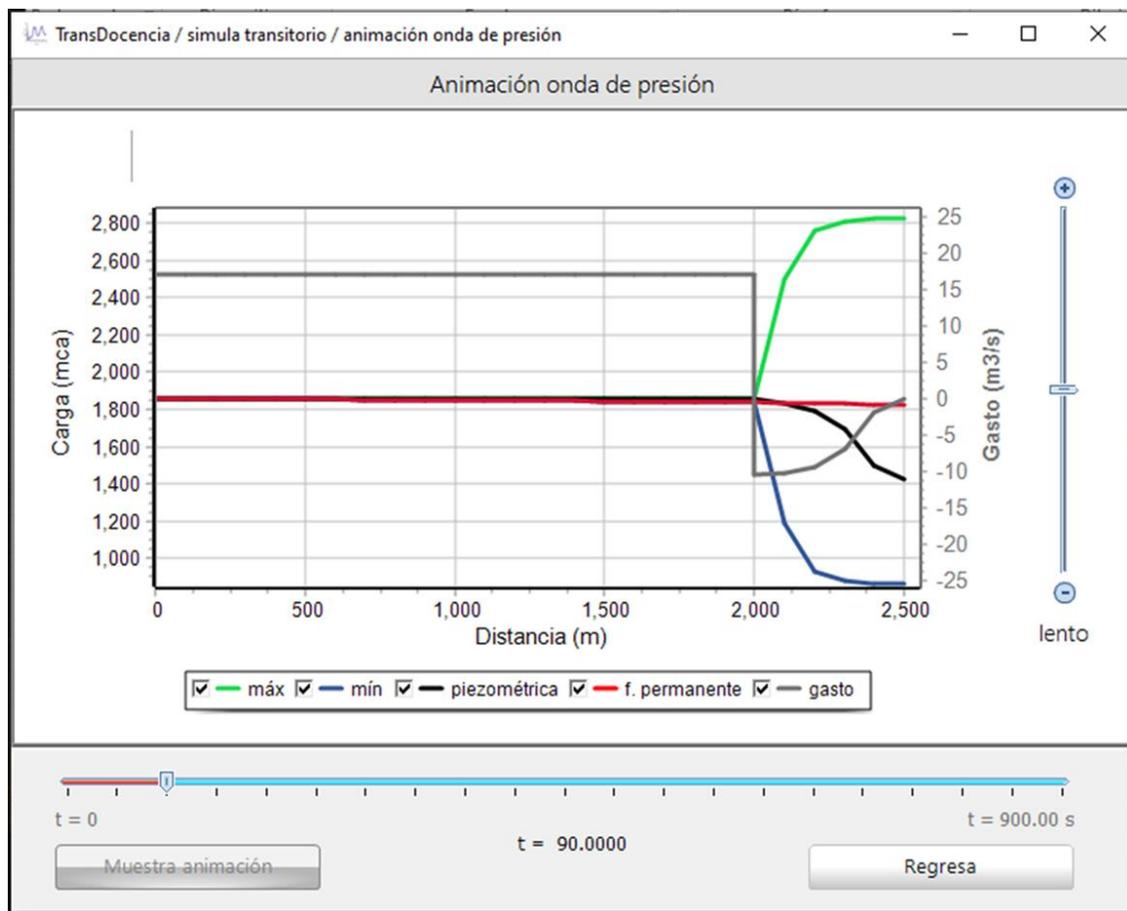


Figura 7.52 En $t = 90.0$ s, se observa la disminución del gasto en el tramo 1

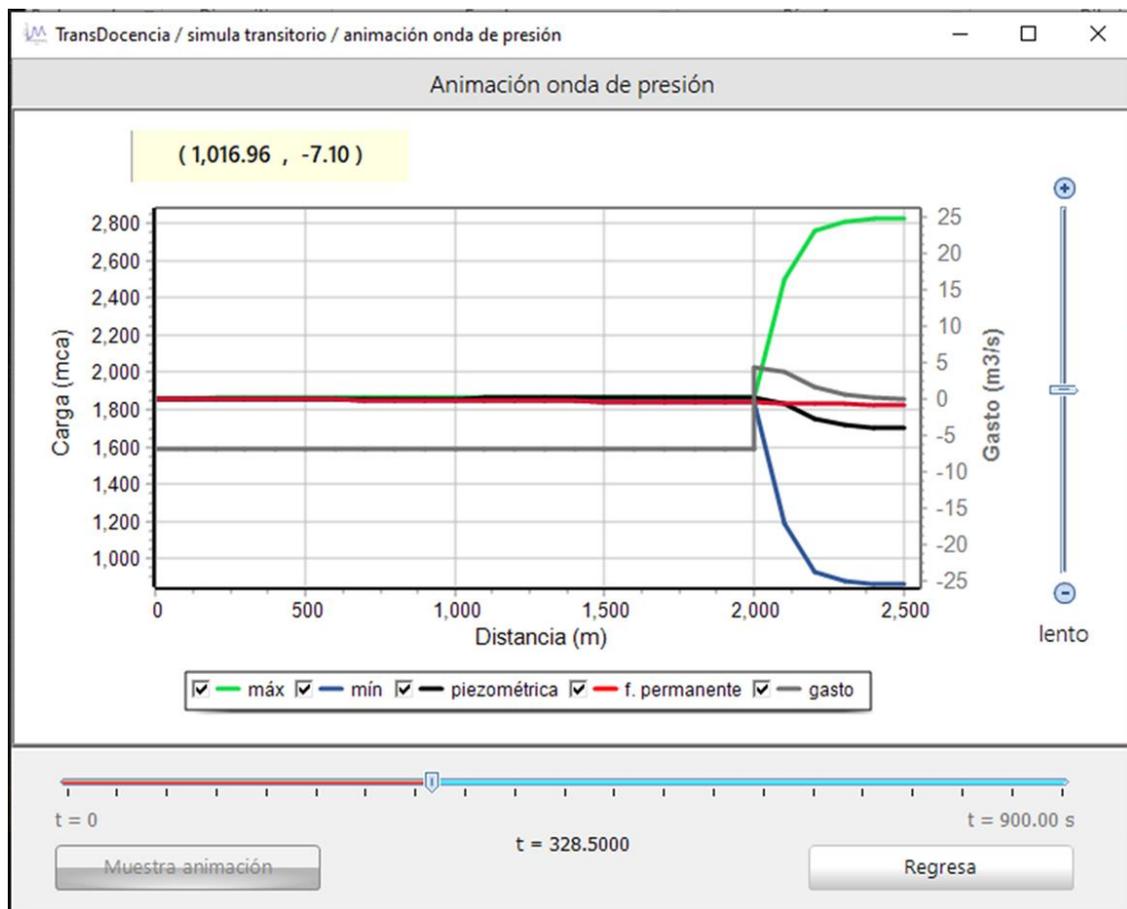


Figura 7.53 En $t = 328.5$ s, el agua en el tramo 1 se dirige del pozo hacia el embalse, en el tramo 2 va del pozo hacia la válvula

7.3.2 Piezométricas máximas y mínimas

Las cargas piezométricas máximas y mínimas obtenidas en el periodo de simulación se observan seleccionando *Cargas piezométricas máximas y mínimas* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9), la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 7.54.

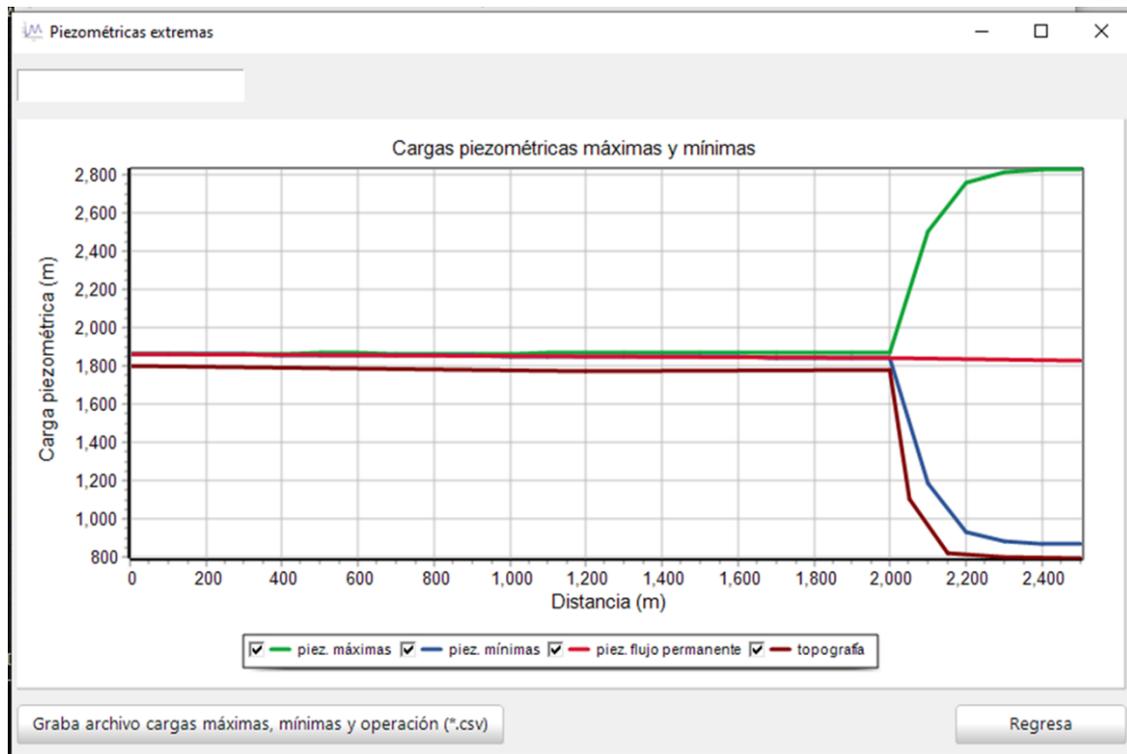


Figura 7.54 Cargas máximas y mínimas obtenidas en el periodo de simulación. Los cambios más importantes de presión quedan confinados entre la válvula y el pozo de oscilación

7.3.3 Cargas

Las cargas obtenidas se analizan a través del botón *Cargas* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9). Para analizar las cargas a la mitad de cada tramo, a partir de la propuesta de la Figura 7.46 se creó la propuesta que se muestra en la Figura 7.55. Las gráficas de las Figura 7.55 a la Figura 7.60 corresponden a diferentes sitios de la conducción.

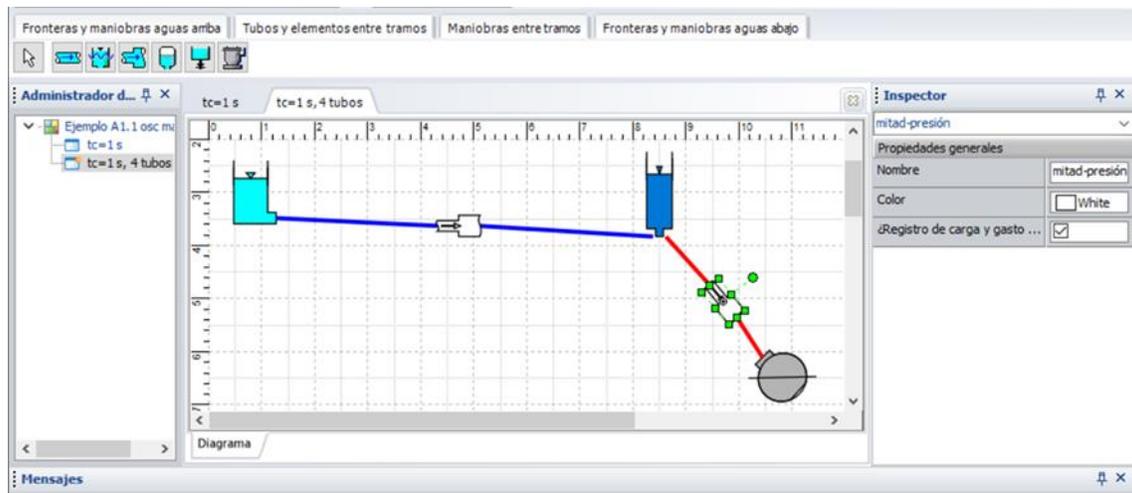


Figura 7.55 Para grabar la carga y el gasto a la mitad de las tuberías se modificó la propuesta original, comparar con la Figura 7.46

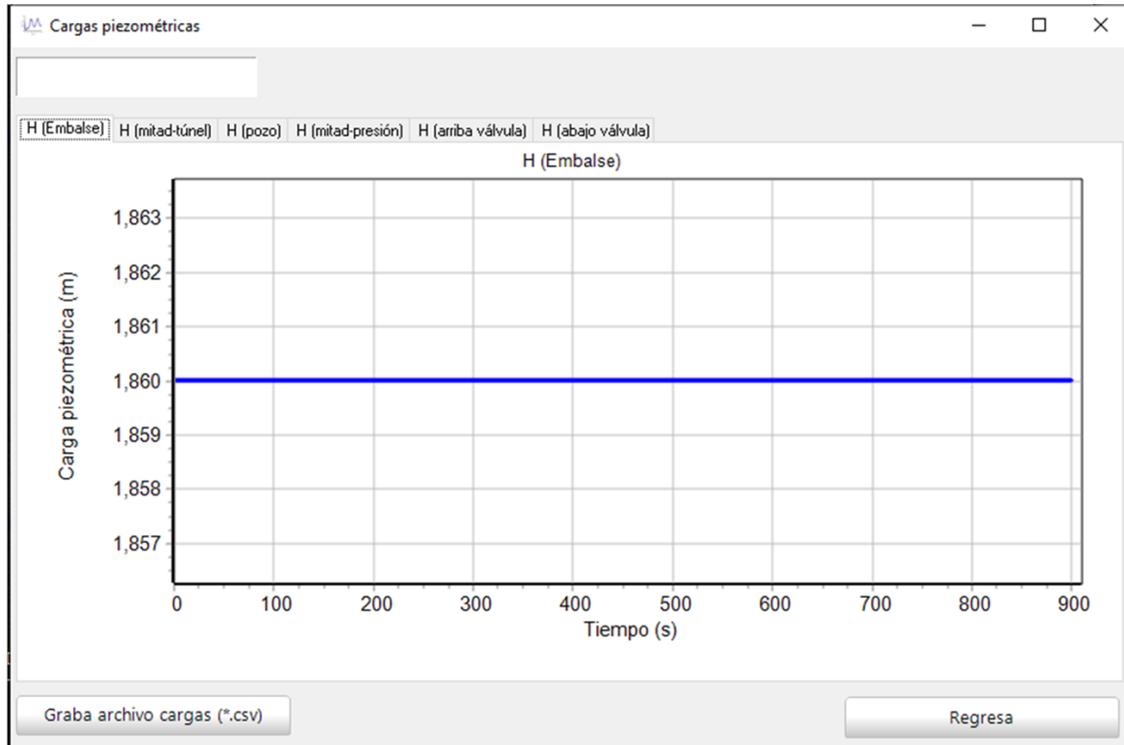


Figura 7.56 El embalse tiene una carga constante igual a 1860 m

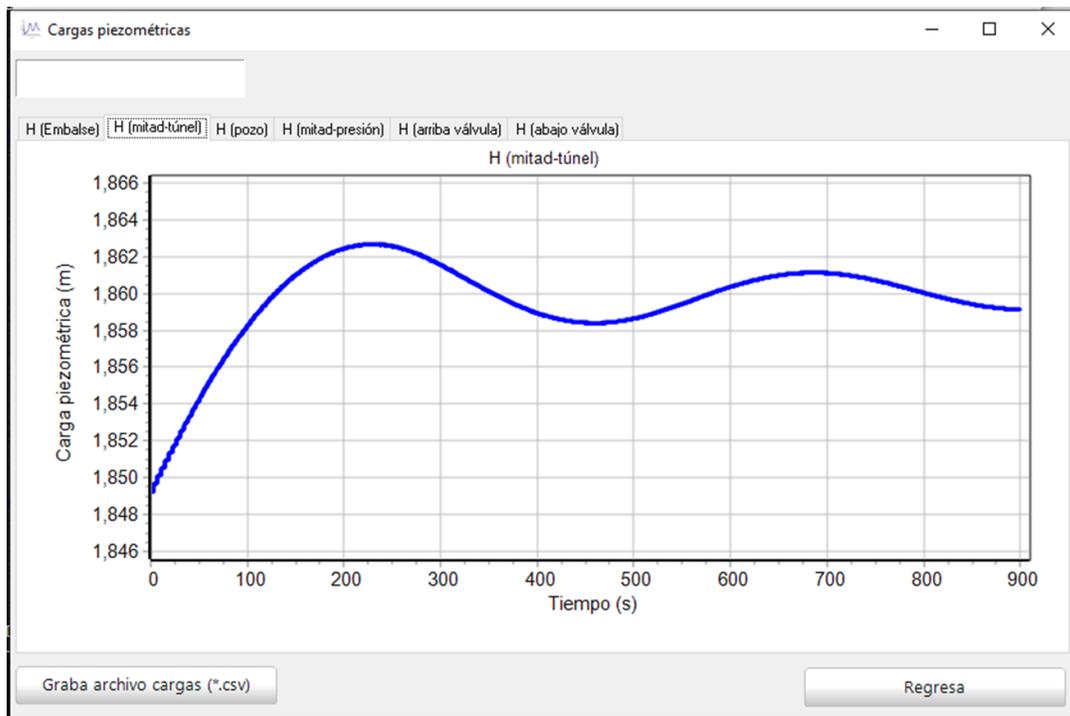


Figura 7.57 Carga a la mitad del tramo 1, la carga máxima se aproxima a 1862.70 m

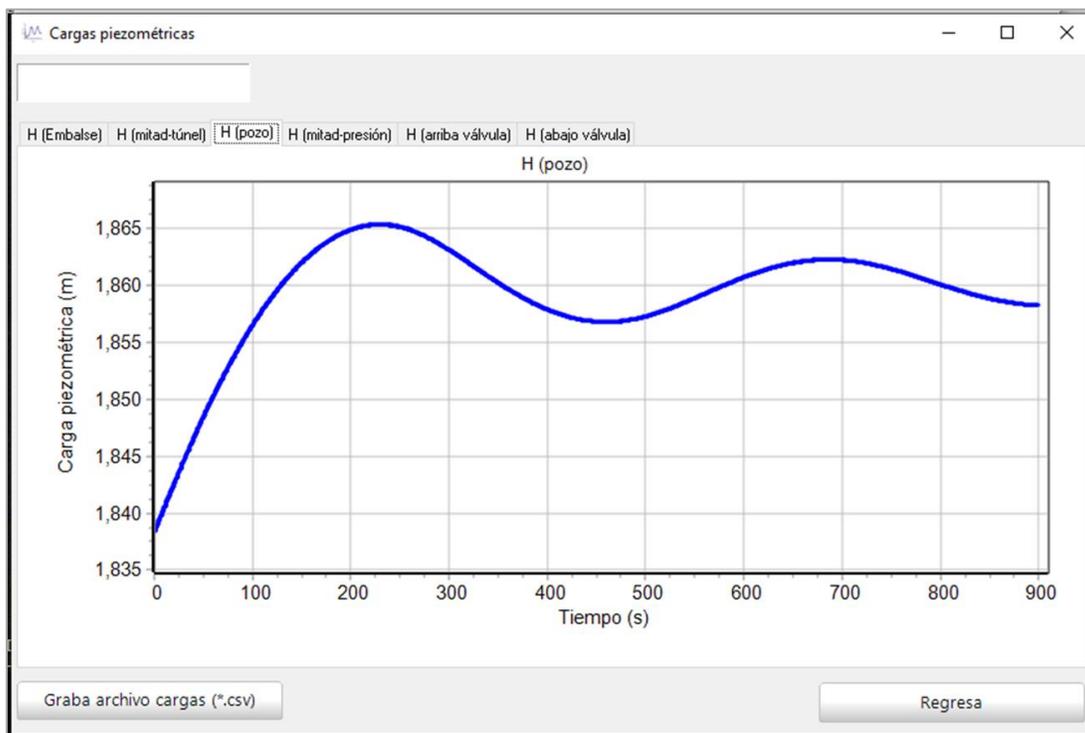


Figura 7.58 Carga en el pozo de oscilación, la carga máxima se aproxima a 1865.34 m

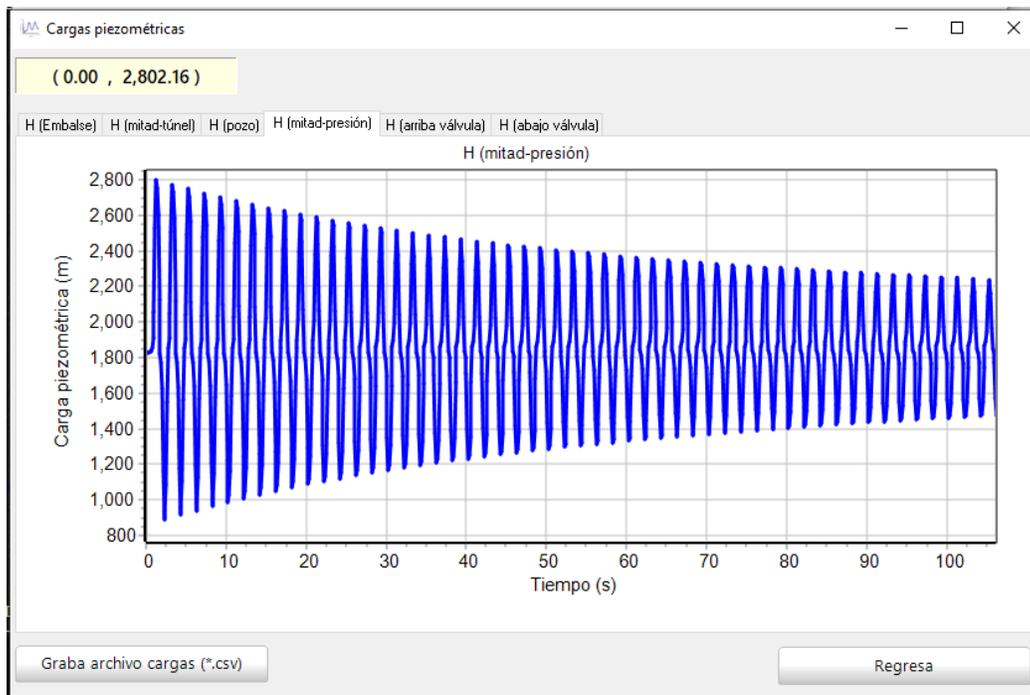


Figura 7.59 Carga en la mitad del tramo 2, en este sitio el transitorio de mayor relevancia es el de golpe de ariete, mientras que en el tramo 1 es el de oscilación de masa o transitorio lento (comparar la Figura 7.57 con la Figura 7.59)

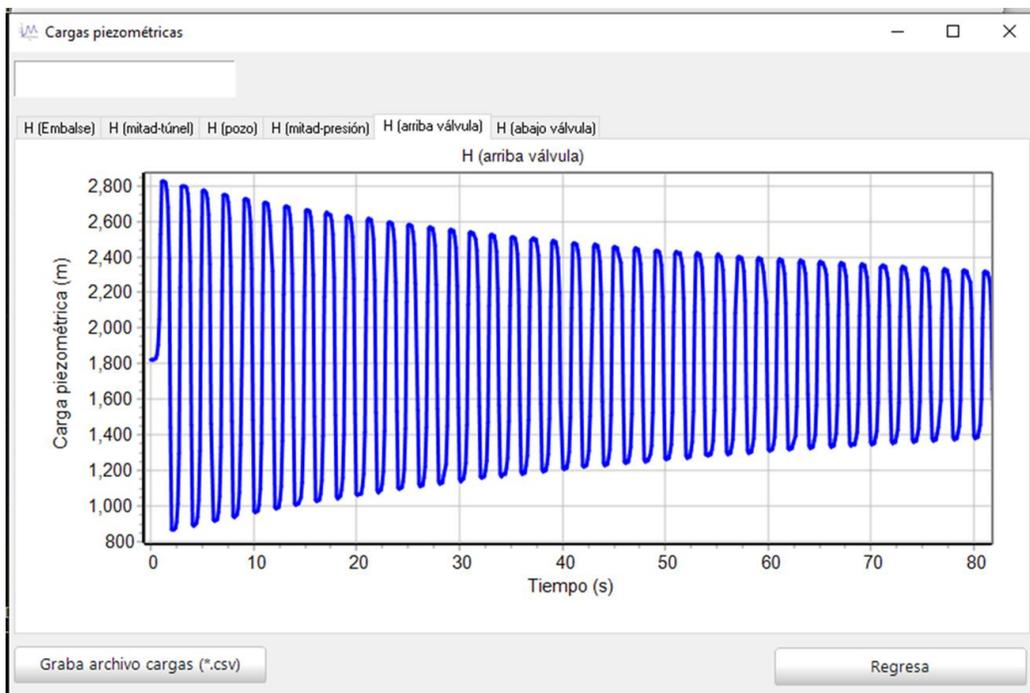


Figura 7.60 Carga aguas arriba de la válvula, sitio en donde se presentan las magnitudes máximas de sobrepresión y subpresión

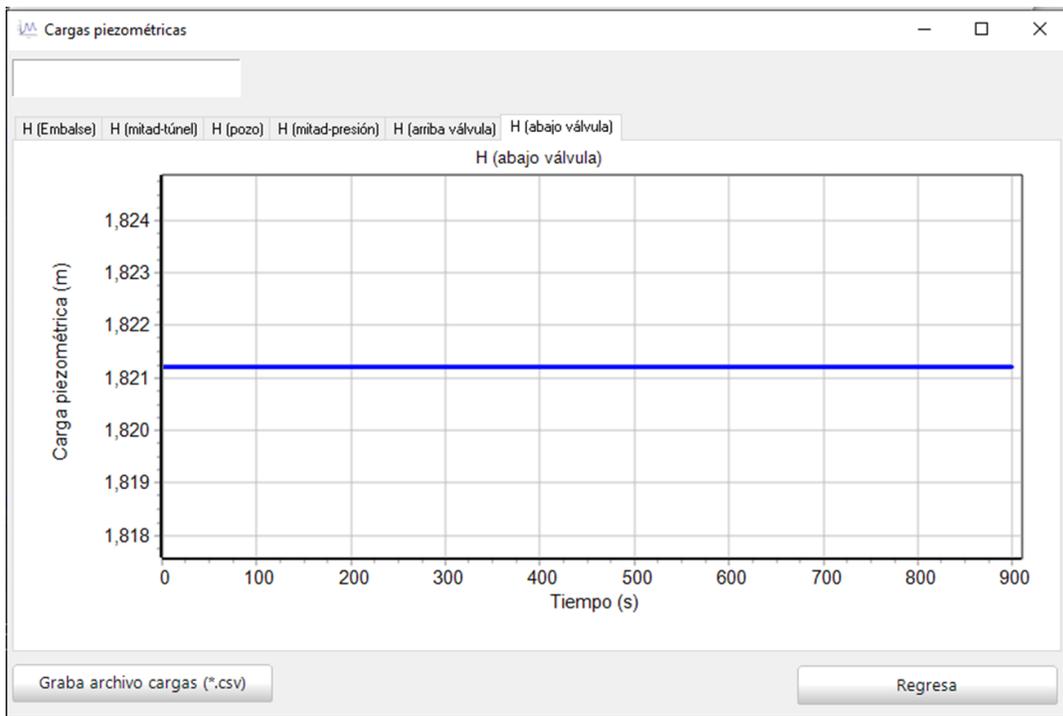


Figura 7.61 La carga aguas abajo de la válvula permanece constante. Su valor se determina a partir de la operación en flujo permanente utilizando la ecuación de la energía considerando la pérdida de carga que introduce la válvula cuando está totalmente abierta

7.3.4 Gastos

Al seleccionar el botón *Gastos* de la Figura 7.9, se tiene acceso a las gráficas de la Figura 7.62 a la Figura 7.67.

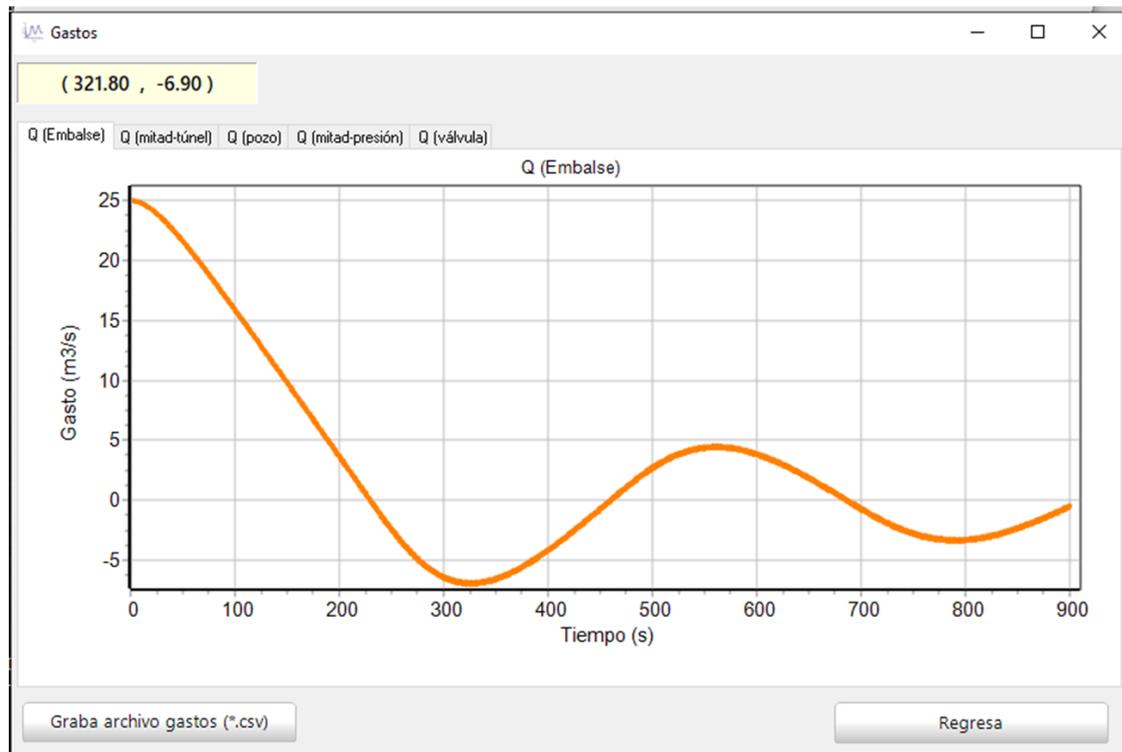


Figura 7.62 Gasto en la tubería inmediatamente aguas abajo del embalse

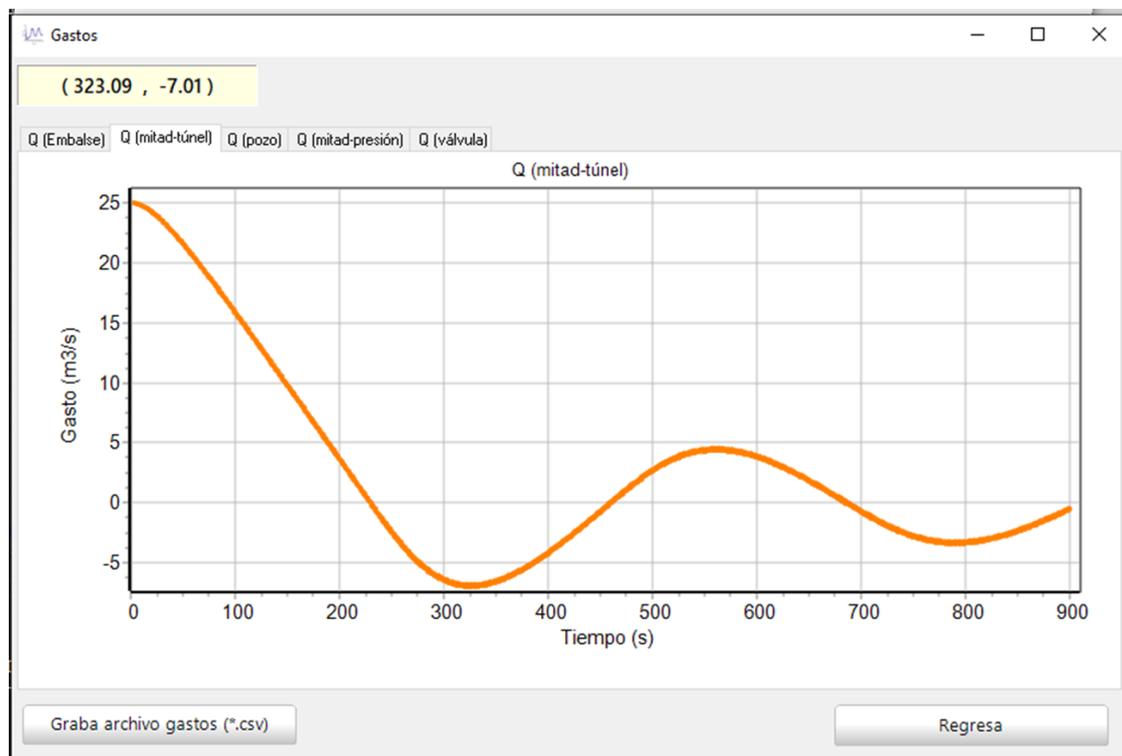


Figura 7.63 Gasto en la mitad del tramo 1. La variación del gasto ocurre lentamente como consecuencia del transitorio lento de oscilación de masa

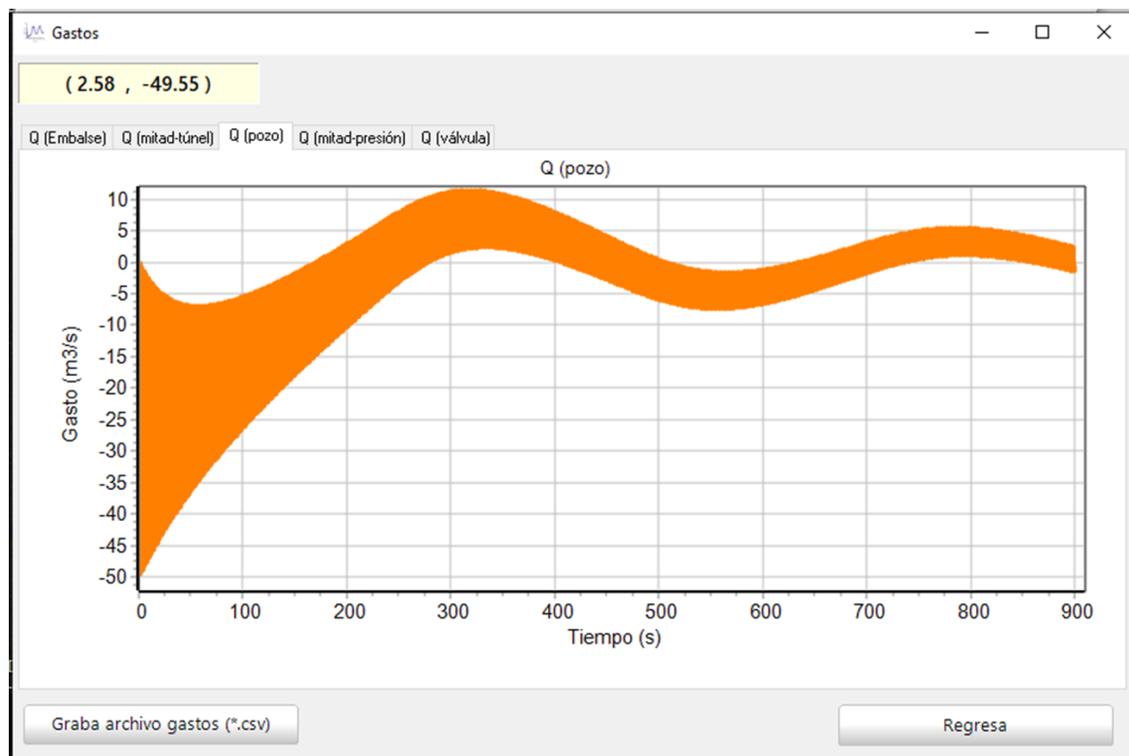


Figura 7.64 Gasto en el pozo, la forma de esta gráfica es el resultado de la superposición de la onda de alta frecuencia producida por el golpe de ariete con la onda de baja frecuencia de la oscilación de masa

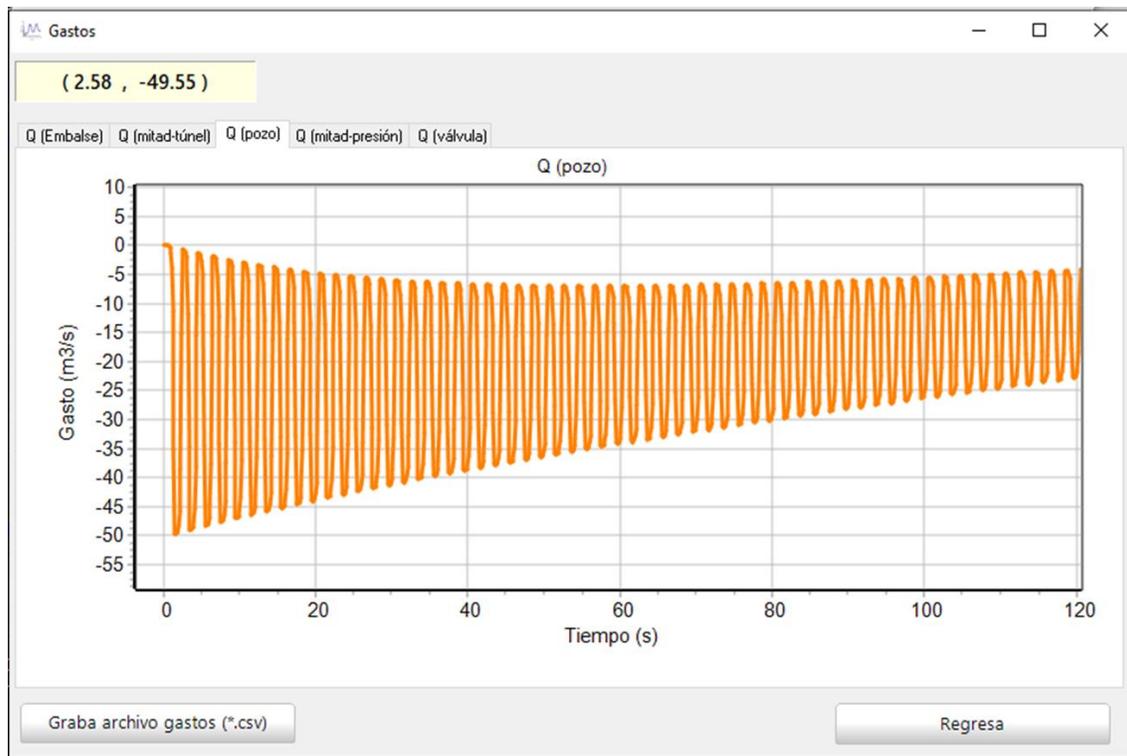


Figura 7.65 Amplificación de la gráfica de gasto en el pozo. El periodo de oscilación de la onda producida por el golpe de ariete, confinada entre la válvula y el pozo, es $4l_2/a = 4(500)/1000 = 2$ s, razón por la que cada 10 s se observan 5 máximos y 5 mínimos. El gasto es negativo cuando el pozo recibe agua y positivo cuando entrega agua a la conducción

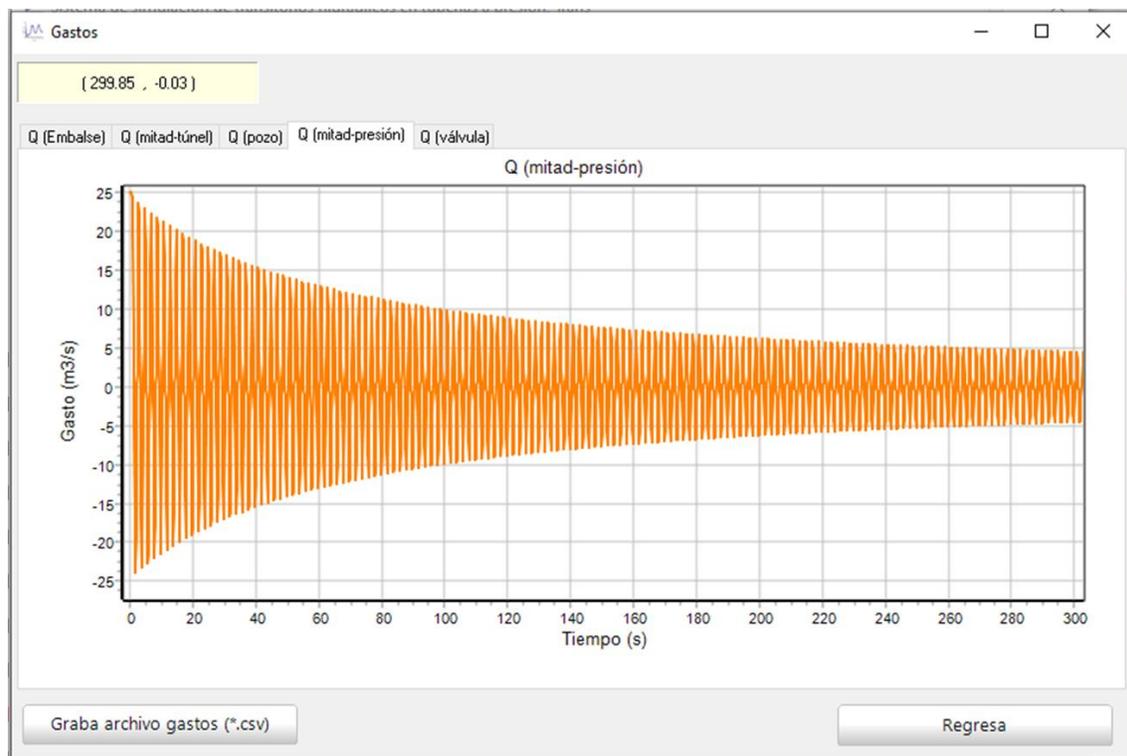


Figura 7.66 Amplificación de la gráfica de gasto en la mitad de la tubería de presión (mitad del tramo 2). La variación del gasto ocurre muy rápido debido a la onda de alta frecuencia producida por el transitorio de golpe de ariete. En el tramo 2 no se presenta el transitorio de oscilación de masa. El agua se detiene mucho más rápido que en el tramo 1, como se muestra en la Figura 7.63

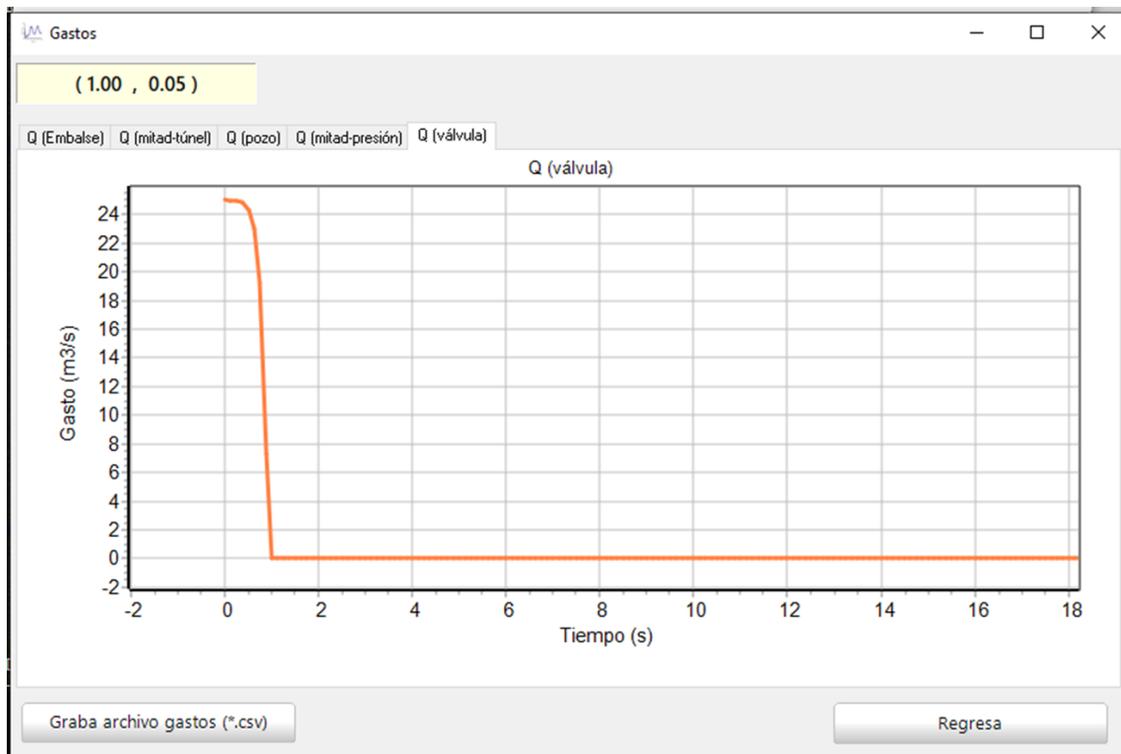


Figura 7.67 Gasto a través de la válvula, la válvula cierra totalmente en 1 s

7.3.5 Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire

La información acerca de la elevación del espejo de agua en el pozo de oscilación se obtiene a través del botón *Niveles de agua en tanques y volúmenes de agua y aire* del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 7.9), al seleccionarlo se muestra la gráfica de la Figura 7.68.

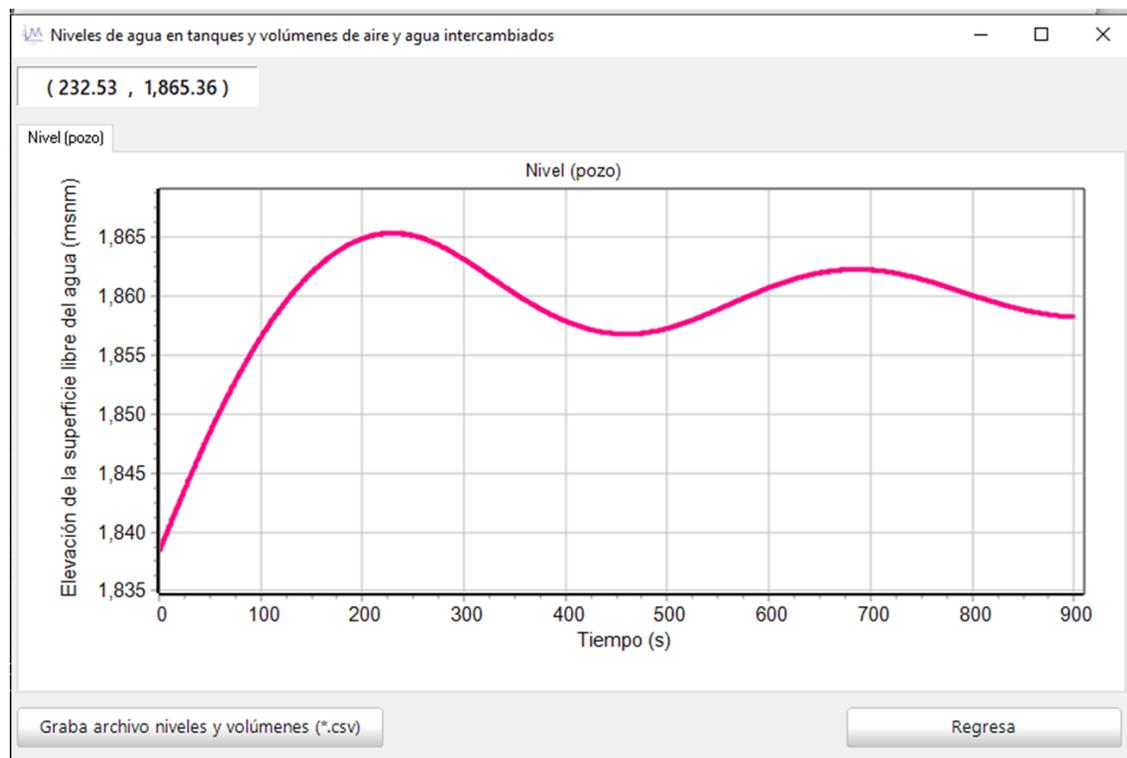


Figura 7.68 Elevación del espejo de agua en el pozo de oscilación

En la Figura 7.69 se compara la elevación del espejo de agua en el pozo de oscilación calculada con la solución numérica del modelo de oscilación de masa y el sistema TransDocencia. Esta gráfica se creó en Excel, para ello, se grabó el archivo de niveles y volúmenes (botón del lado izquierdo en la parte inferior de la Figura 7.68) y se graficó junto con los resultados obtenidos con el método de Euler (Figura 7.40).

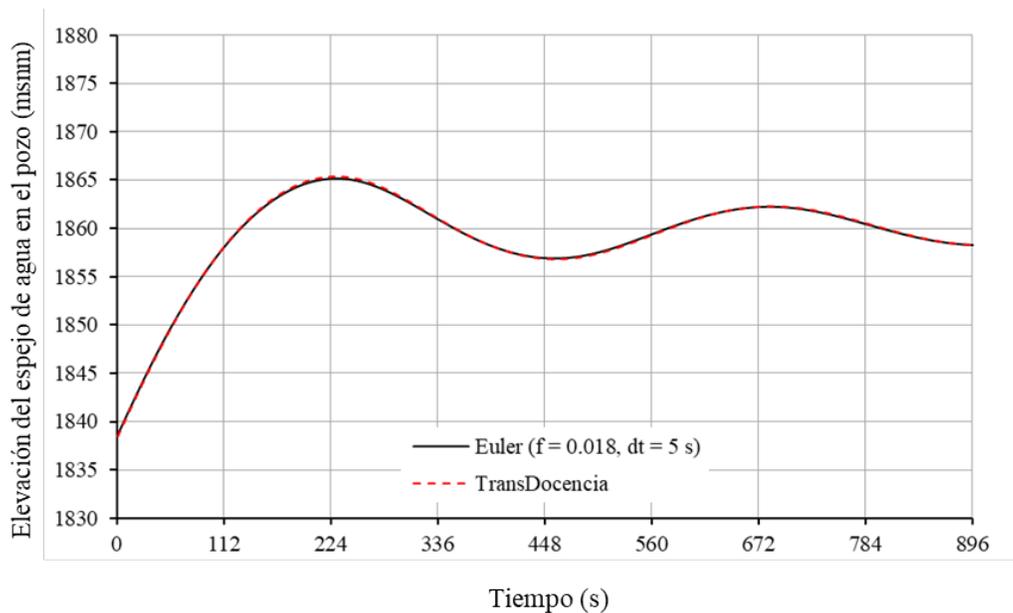


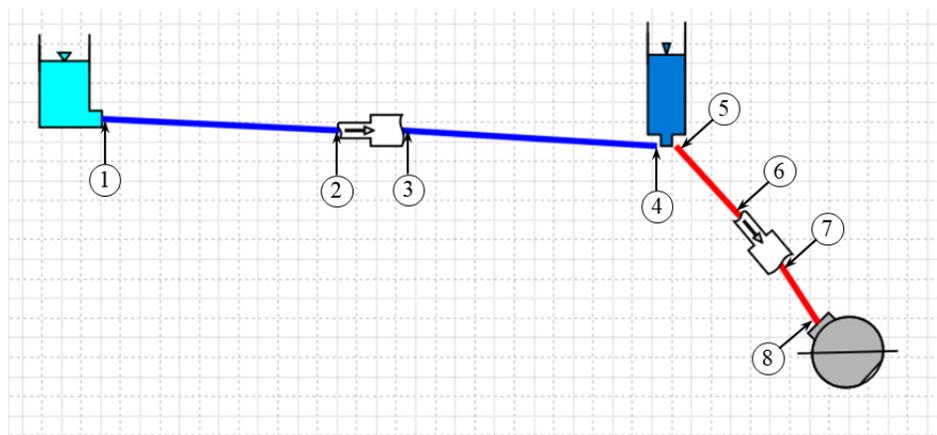
Figura 7.69 Comparación de la elevación del espejo de agua en el pozo de oscilación obtenida con la solución numérica del modelo de oscilación de masa y TransDocencia cuando el cierre de la válvula es instantáneo

7.3.6 Reporte de la simulación

Con el botón *Reporte* de la Figura 7.9 se tiene acceso a información de la conducción y a algunos resultados de la simulación. La Figura 7.70 es la parte superior del reporte de la simulación, en la Figura 7.71 se muestra el significado de los datos de las tablas de la Figura 7.70.

Condiciones de operación en flujo estable					Cargas máximas y mínimas en los extremos de cada tubo				
Gasto y cargas piezométricas en los extremos de cada tubo					Extremo aguas arriba		Extremo aguas abajo		
Tubo	Cadenam. inicio tubo	H ags arriba (m)	H ags abajo (m)	Q (m ³ /s)	Tubo	H_máx (m)	H_min (m)	H_máx (m)	H_min (m)
1	0.000	1,860.000	1,849.252	25.000	1	1,860.000	1,860.000	1,862.704	1,849.252
2	1,000.000	1,849.252	1,838.504	25.000	2	1,862.704	1,849.252	1,865.392	1,838.504
3	2,000.000	1,838.504	1,830.305	25.000	3	1,865.392	1,838.504	2,802.944	888.369
4	2,250.000	1,830.305	1,822.106	25.000	4	2,802.944	888.369	2,827.179	863.770

Figura 7.70 En la parte superior del reporte se muestra información de las operaciones en flujo permanente y transitorio en los extremos de los tramos de la conducción



Sección de la conducción	Flujo permanente	Flujo transitorio	
	Carga (m)	Carga máxima (m)	Carga mínima (m)
1	1860.000	1860.000	1860.000
2	1849.252	1862.704	1849.252
3	1849.252	1862.704	1849.252
4	1838.504	1865.392	1838.504
5	1838.504	1865.392	1838.504
6	1830.305	2802.944	888.369
7	1830.305	2802.944	888.369
8	1822.106	2827.179	863.770

Figura 7.71 Las cargas indicadas en la Figura 7.70 corresponden a las secciones de la conducción identificadas en el esquema del acueducto. Los valores de las cargas que se leen sobre las gráficas de resultados de cargas son menos precisos que los mostrados en el reporte

7.4 Ejemplo 4. Simulación del transitorio generado por el paro súbito del bombeo

El objetivo de este ejemplo es simular el transitorio que produce el paro súbito de los equipos de bombeo del acueducto de la Figura 7.72. En la planta de bombeo operan cinco equipos iguales, cada uno proporciona un caudal de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, en la Figura 7.73 se muestra la curva de operación en flujo permanente. En flujo permanente, la válvula en la descarga de cada bomba está totalmente abierta, es esférica de diámetro igual a la tubería, aunque en casos reales su diámetro es menor que el de la tubería. En la Tabla 7.5, se indican las características de la conducción.

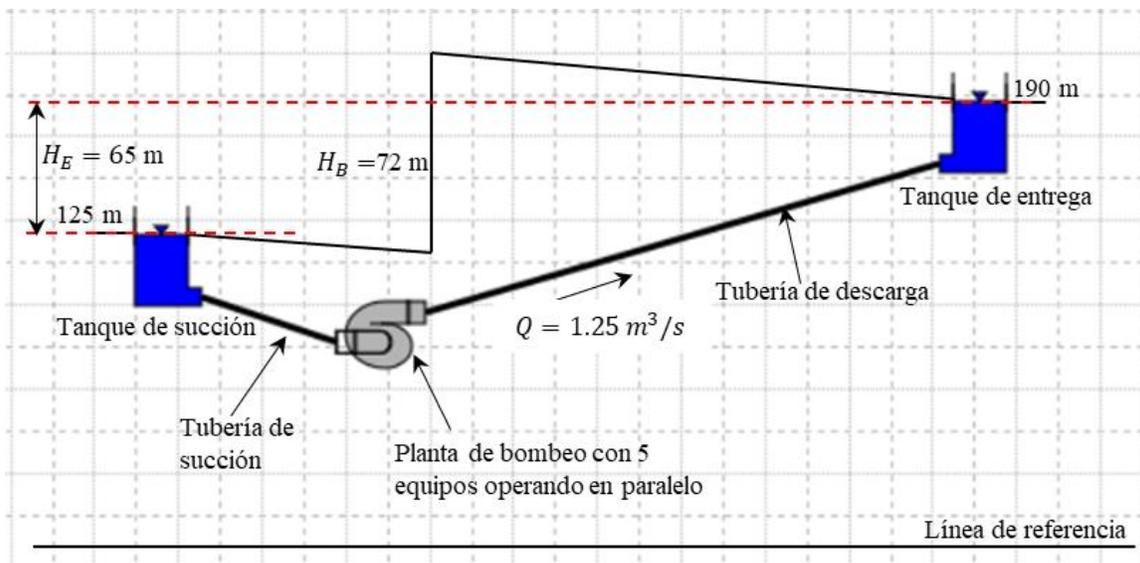


Figura 7.72 Antes de simular un transitorio se debe conocer la operación del sistema en flujo permanente

Tabla 7.5 Características de los tramos de conducción del acueducto de la Figura 7.72

	Longitud L (m)	Diámetro D (m)	Factor de fricción $f(D-W)$	Celeridad (m/s)
T. Succión	371.59	1.22	0.012	1000
T. descarga	8052.41	1.22	0.012	1000

El transitorio se describe con las ecuaciones que modelan la operación de cada elemento que forma parte del sistema hidráulico, en este caso: i) tuberías elásticas y fluido compresible, modelo de golpe de ariete descrito por las ecuaciones A2.4 y A2.5 cuya solución (ecuaciones A2.17 y A2.18) se obtiene con el método de las características (Sección A2.2); ii) la condición de frontera aguas arriba, tanque de carga constante, descrito con la Ecuación A2.18 donde H_P es la carga en el tanque; iii) la operación en flujo transitorio de las bombas descrito a través de las ecuaciones A10.23 y A10.24.

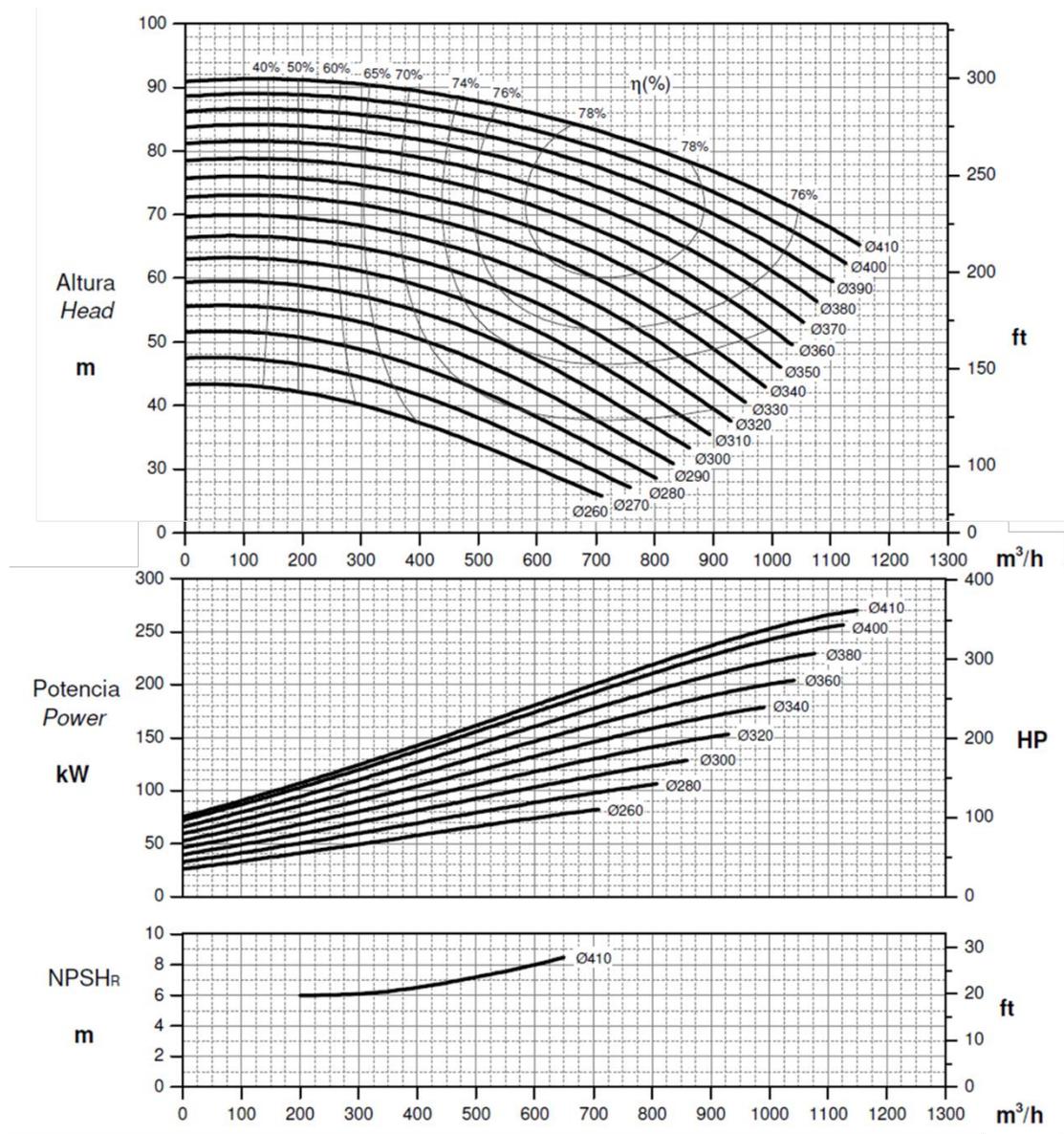


Figura 7.73 Curva de un equipo de bombeo en operación con flujo permanente con velocidad nominal 1750 rpm (INOXPA, 2020)

Para simular la operación de las bombas, se debe proporcionar las características de diseño de una bomba, las que se obtienen de la Figura 7.73 y el punto en el que opera una bomba en flujo permanente, que es el punto de intersección de la curva del sistema con la curva de la bomba. La curva del sistema se obtiene con la Ecuación 7.11.

$$H_B = H_E + K Q^2 \quad (7.11)$$

$$K = \frac{1}{2g} \left[\sum_{i=1}^n \frac{f_i L_i}{D_i A_i^2} + \sum_{j=1}^m \frac{k_j}{A_j^2} \right] \quad (7.12)$$

donde

H_B es la carga de bombeo, en m

H_E es la carga estática, en m

Q es el gasto de operación en flujo permanente, en m³/s

K es el coeficiente global de pérdida del sistema, en s²/m⁵

D_i es el diámetro del tramo i , en m

L_i es la longitud del tramo i , en m

A_i es el área transversal del tramo i , en m²

f_i es el factor de fricción de Darcy-Weisbach del tramo i , adimensional

k_j es el coeficiente de pérdida de carga del accesorio j , adimensional

A_j es el área transversal de la tubería aguas abajo del accesorio j , en m²

g es la aceleración de la gravedad, en m/s

n es el número de tramos que forman la conducción

m es el número de accesorios que introducen pérdida de carga

La carga estática $H_E = 65$ m (ver Figura 7.72). La parte de K correspondiente a las pérdidas por fricción, se obtiene sustituyendo en la primera sumatoria de la Ecuación 7.12 los datos de la Tabla 7.5, la parte de K correspondiente a los accesorios instalados a lo largo del acueducto se determina con la segunda sumatoria de la Ecuación 7.12. En este ejemplo, los únicos accesorios que se consideran son las válvulas en la descarga de cada bomba. De la Figura 3.6, se obtiene que el coeficiente de pérdida de carga adimensional de la válvula esférica completamente abierta es 0.18. Al sustituir los datos en la Ecuación 7.12, se obtiene:

$$K = \frac{1}{2(9.81)} \left[\frac{0.012(371.59)}{(1.22)(1.169)^2} + \frac{0.012(8052.41)}{(1.22)(1.169)^2} + \frac{0.18}{(1.169)^2} \right] = 3.097 \text{ s}^2/\text{m}^5 \quad (7.13)$$

Por lo que, la curva del sistema está dada por la Ecuación 7.14, su gráfica se muestra en la Figura 7.74. Al sustituir el gasto de operación, $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtiene que la carga de bombeo necesaria es de 69.84 m .

$$H_B = 65 + 3.097 Q^2 \quad (7.14)$$

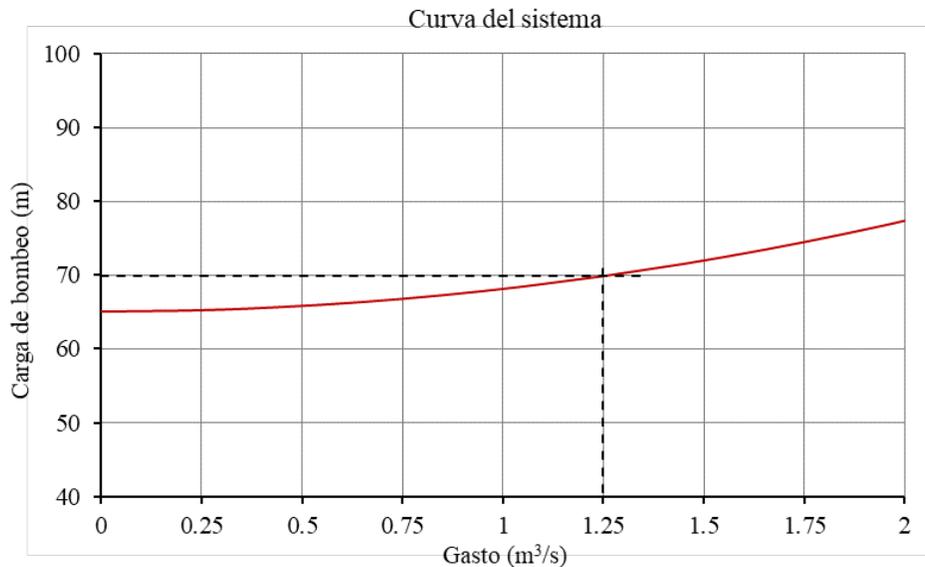


Figura 7.74 Curva del sistema, para conducir el gasto de operación, $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$, se necesita una carga de bombeo de 69.84 m

En la Figura 7.75 se muestra la curva de operación de una bomba en flujo permanente junto con la curva del sistema, en la que se ha dividido el gasto entre cinco debido a que una sola bomba proporciona la quinta parte del gasto de operación. En esta figura se señalan el punto de diseño de la bomba, punto en el que la bomba opera con máxima eficiencia y el punto de operación en el que estará operando un equipo de bombeo cuyo diámetro de impulsor es de 390 mm .

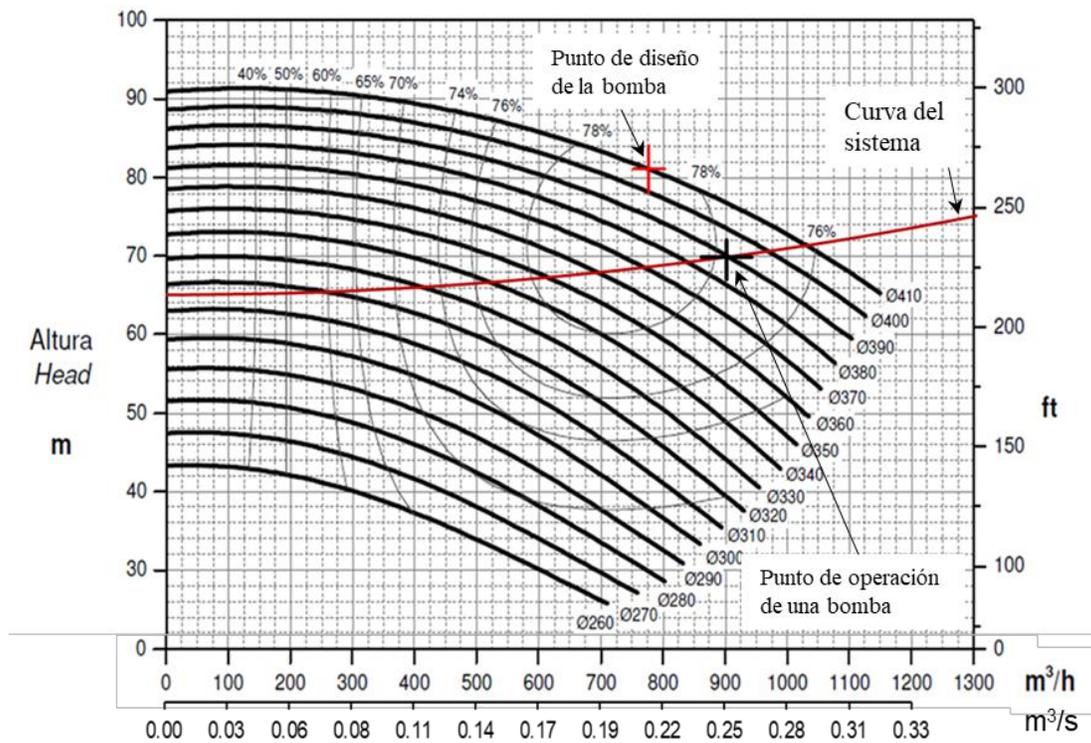


Figura 7.75 Punto de diseño de la bomba y punto de operación de la bomba para entregar 69.84 m de carga y 0.25 m^3/s , la quinta parte del gasto de operación, el diámetro del impulsor es de 390 mm

7.4.1 Simulación del transitorio

El procedimiento para crear el acueducto y simular el transitorio es similar a los descritos en los ejemplos anteriores, por lo que únicamente se presenta la pantalla correspondiente al paro de emergencia de equipos de bombeo ubicados entre tramos de la conducción.

En la Figura 7.76 se muestra la pantalla con los datos necesarios para simular el paro de emergencia del bombeo ubicado entre dos tramos de la conducción. Entre ellos, el punto de diseño del equipo de bombeo (Tabla 7.6) y el punto de operación del mismo (Tabla 7.7), cabe recordar que se considera que todas las bombas son iguales, en este caso cinco bombas.

Tabla 7.6 Punto de diseño de la bomba

Q_R (m^3/s)	H_R (m)	$\eta_{m\acute{a}x}$	N_R (rpm)
0.215	81	0.78	1750

Tabla 7.7 Punto de operación de la bomba

Q (m ³ /s)	H (m)	η
0.25	69.84	0.775

Las curvas características (f_h y f_β) para simular el paro súbito de los equipos de bombeo se seleccionan a través de su velocidad específica, la que se calcula con la Ecuación A10.1 de donde se obtiene la expresión 7.15, considerando que la bomba es de succión sencilla y un solo impulsor (ver Anexo A10).

$$N_s = 1750 \frac{\sqrt{0.215}}{81^{0.75}} = 30.05 \quad (7.15)$$

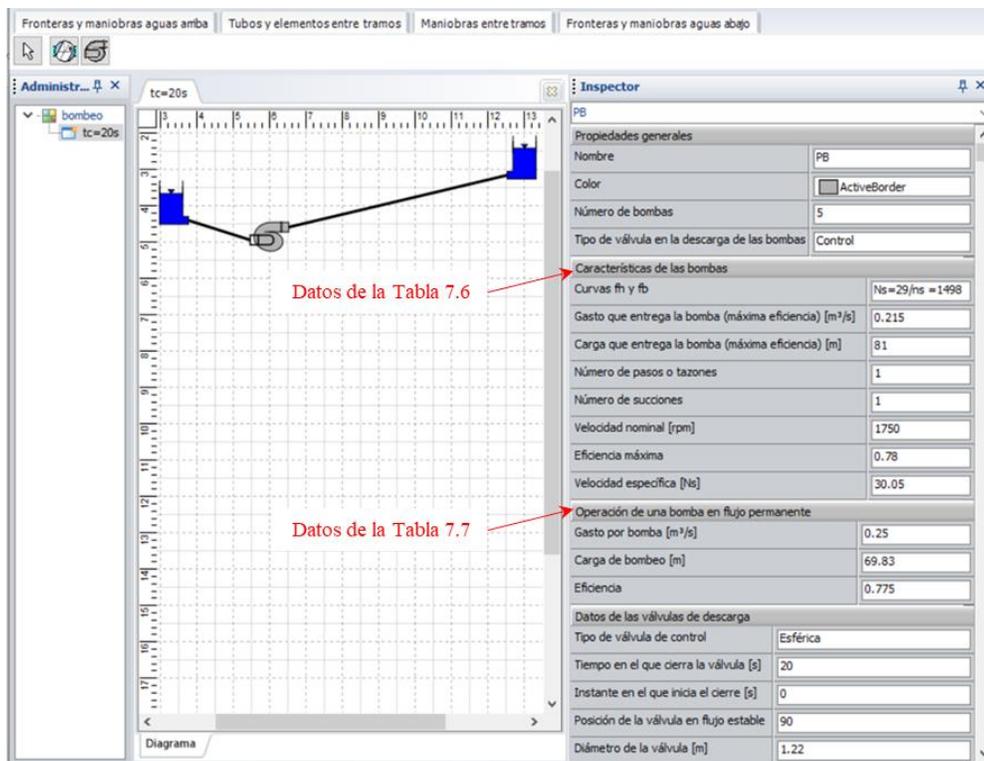


Figura 7.76 Los datos de las bombas que se proporcionan corresponden a los de un equipo, en la sección "Propiedades generales" se indica el número de bombas. El dato Curvas f_h y f_β se selecciona a través de la velocidad específica de la bomba, de la lista que se despliega se selecciona el valor más cercano. El tipo de válvula en la descarga que se seleccionó para el ejemplo es de cierre controlado de tipo esférica, en flujo permanente está totalmente abierta, su diámetro se consideró igual al de la tubería de descarga y el tiempo de cierre asignado es de 20 s

7.4.2 Resultados de la simulación

Como se indicó en la Sección 6, al término de la simulación se activan los botones del panel “Gráficas de resultados y reporte de la simulación” (Figura 6.1). A través de las gráficas a las que se tiene acceso se realiza el análisis de los resultados obtenidos, a continuación, se presentan las gráficas obtenidas. El lector puede realizar el ejemplo y analizar todas las gráficas.

La Figura 7.77 muestra las cargas piezométricas extremas obtenidas el periodo de la simulación (120 s).

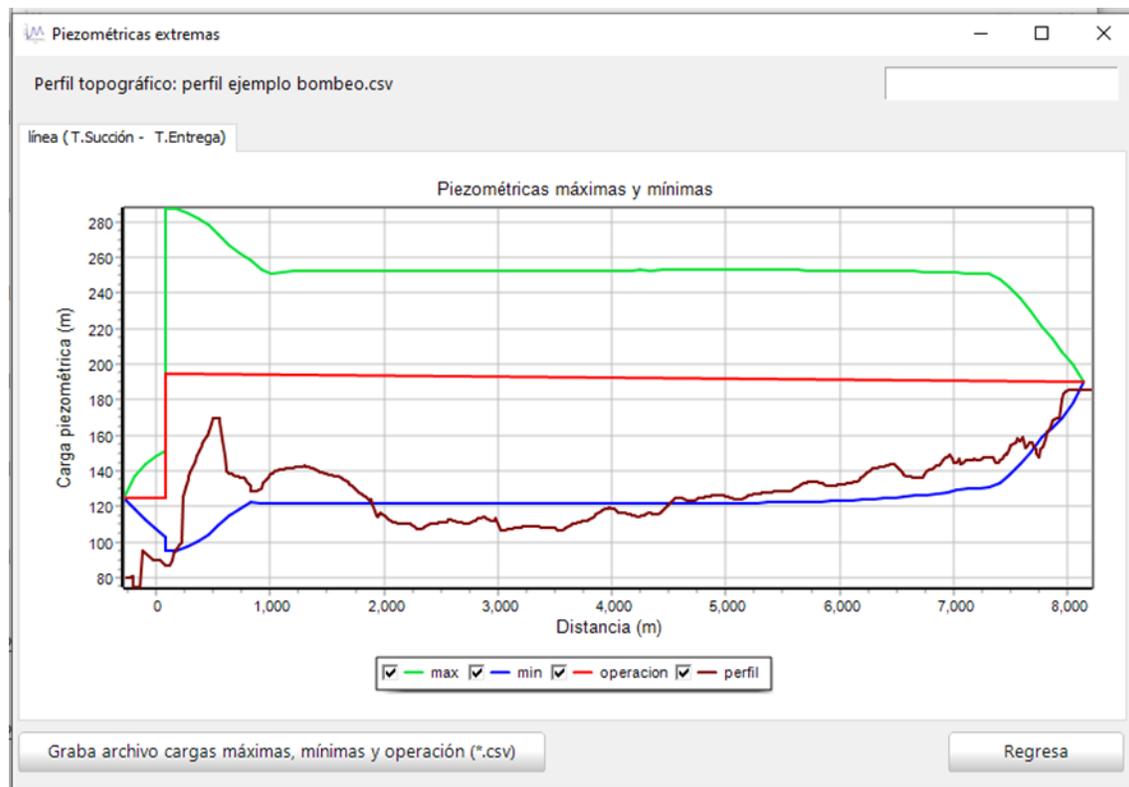


Figura 7.77 Cargas piezométricas máximas y mínimas obtenidas durante el periodo de simulación de 120 s. Se observa la máxima sobrepresión en la descarga de las bombas y tramos de la conducción sometidos a depresión, las zonas en donde la línea de cargas piezométricas mínimas está debajo del perfil de desplante de la tubería (topografía)

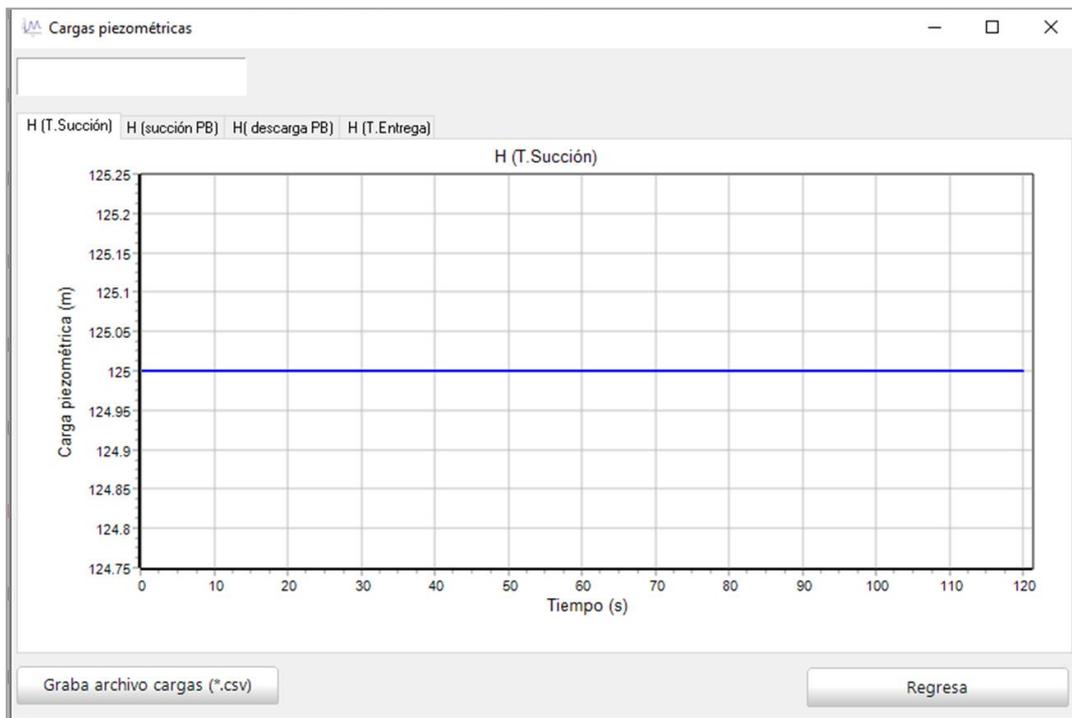


Figura 7.78 Se considera que el área transversal del tanque de succión o tanque de sumergencia es lo suficientemente grande como para mantener la carga piezométrica constante durante el transitorio

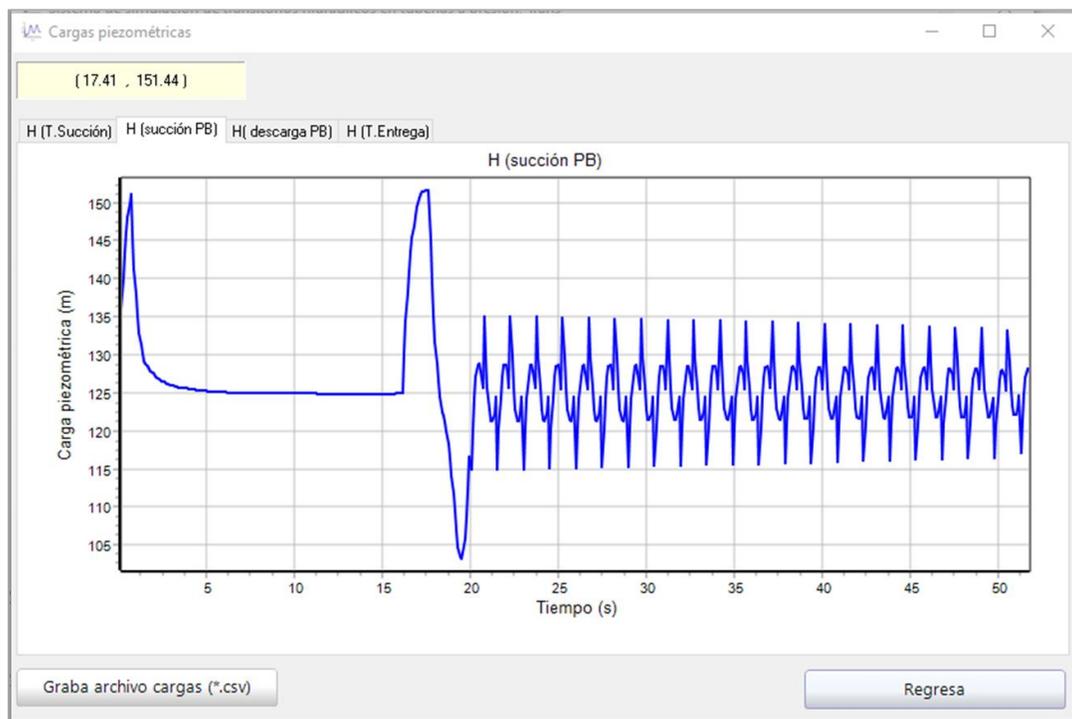


Figura 7.79 Carga piezométrica en la sección inmediata aguas arriba de la bomba

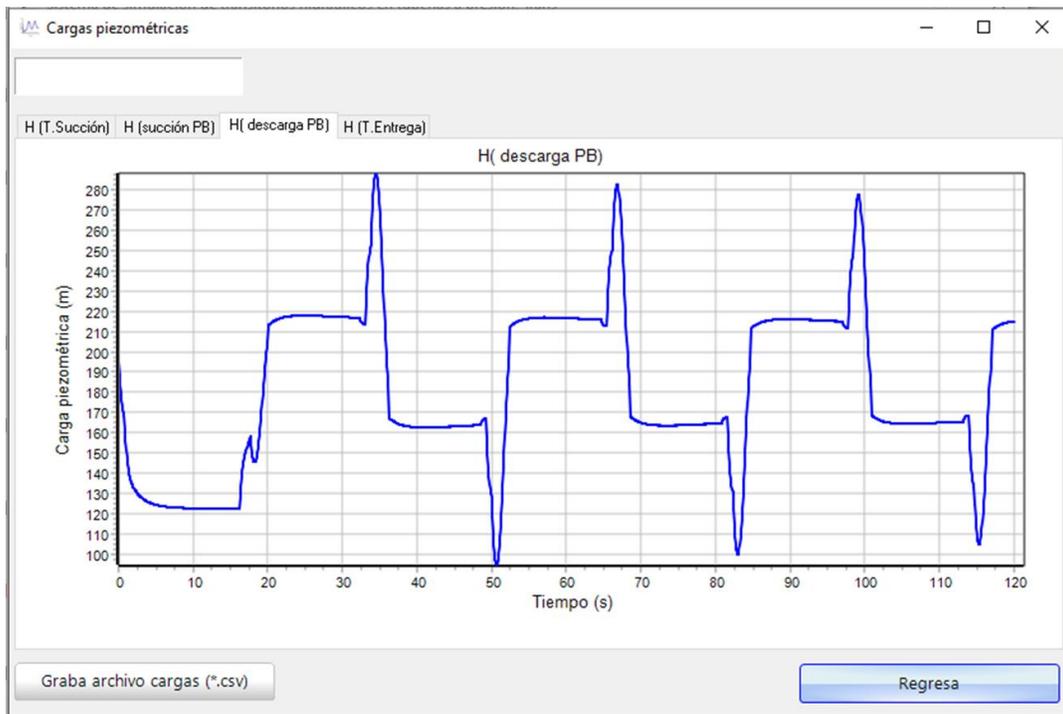


Figura 7.80 Carga piezométrica en la sección inmediata aguas abajo de la bomba

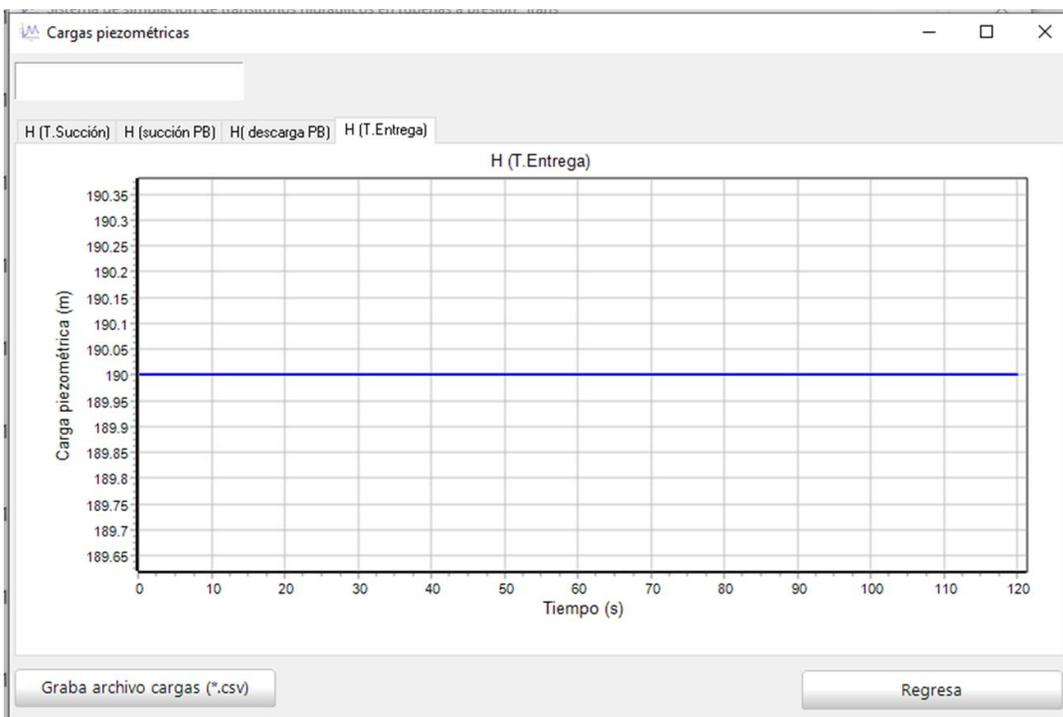


Figura 7.81 Se considera que el área transversal del tanque de entrega o tanque de descarga es lo suficientemente grande como para mantener la carga piezométrica constante durante el transitorio



Figura 7.82 Gasto que pasa a través del rodete de una bomba, la válvula en la descarga cierra totalmente en $t = 20$ s

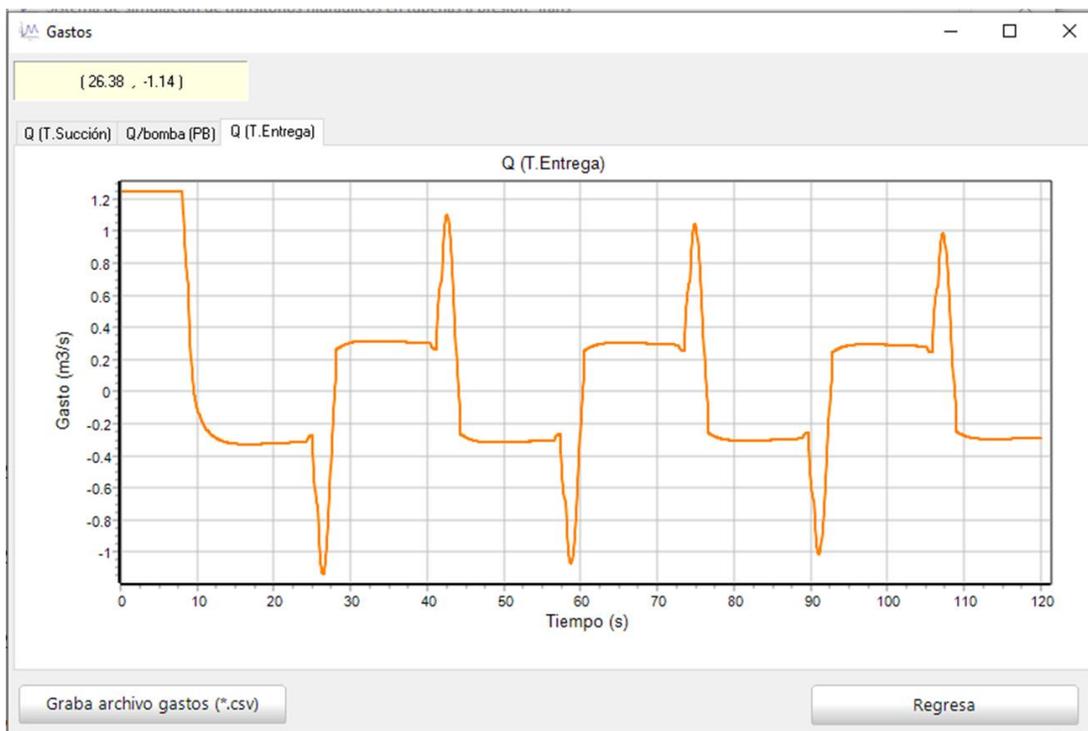


Figura 7.83 Gasto en el tanque de descarga, al terminar el transitorio el gasto es cero

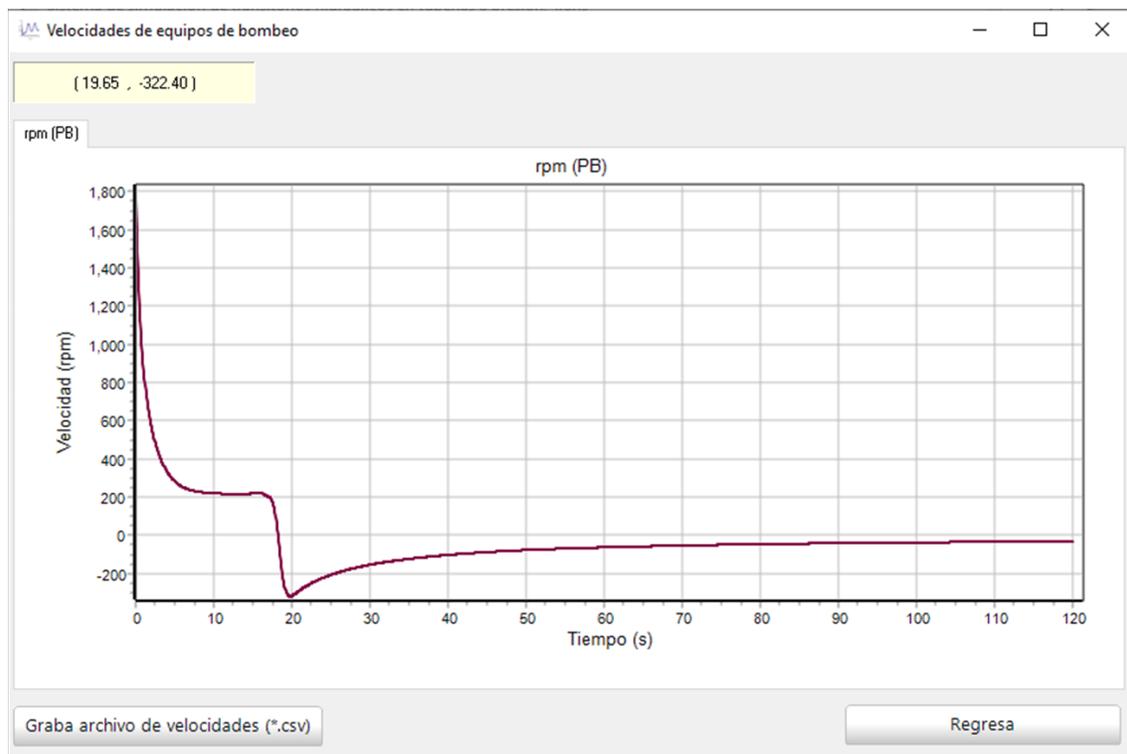


Figura 7.84 Velocidad de giro de las bombas. Debido al caudal en dirección hacia la succión de las bombas, ver Figura 7.82, las bombas giran en sentido inverso durante unos segundos

8. Referencias

- Cafaggi, F. A., Rodal, C. E. & Sánchez, H: A. (2016). *Sistemas de bombeo*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Carmona, P. L. & Carmona, P. R. (2013). *Manual del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión: TRANS, versión 2010.1.0*. Distrito Federal, México: Serie Manuales, SM14, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Carmona, P. L., Castillo, H. G. & Carmona, P. R., Instituto de Ingeniería, UNAM (2019). *Manual del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en conductos a presión TRANS, versión docencia*. Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME PE104017.
- Carmona, P. R., Carmona, P. L. & Zarco, H. J. A. (10, 2002). Modelo paramétrico para calcular dimensiones de tanques de oscilación y de cámaras de aire en sistemas a bombeo. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*. La Habana, Cuba.
- Chaudhry, M. H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Princeton: Van Nostrand Reinhold Company.
- Guarga, F. R., Sánchez, B. J. L., Carmona, P. R., Aguilar, L., Solorio, A., Rodal, C. E., Carmona, P. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1984). *Acueducto Linares Monterrey. Diseño hidráulico del tramo Cerro Prieto-Garrapatas. Revisión del diseño hidráulico del tramo Garrapatas-San Roque*.
- Guarga, F. R., Sánchez, B. J., Carmona, P. R. & Aguilar, M. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1985). *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. Fascículo III, Transitorios hidráulicos en conductos a presión*.
- Guarga, F. R., Sánchez, B. J., Carmona, P. R. & Aguilar, M. L. Instituto de Ingeniería, UNAM (1985). *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. Fascículo IV, Control de Transitorios Hidráulicos*.
- INOXPA. (02 de 2020). Obtenido de <https://www.inoxpa.es/uploads/document/Corbes/DIN-FOOD/01.110.12.0020.pdf>
- KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A. (12 de 2002). *www.hidroterm.com.ve*. Obtenido de https://www.hidroterm.com.ve/documentacion/tutoriales/Manual_Entrenamiento_KSB_CS_B.pdf
- Swamee, P. K. (1993). Design of a Submarine Oil Pipeline. *Journal of Transportation Engineering*, 119(1), 159-170.

- Thorley. (1991). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. London: D. & L. George Ltd.
- Wylie, B. E., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc.

9. Bibliografía

- Abreu, J. M., Acosta, A., Andreu, M., Cabrera, E., Cataldo, J., Espert, V. B., Fuentes, V. S., García, A., García, S. J., Guarga, F. R., Iglesias, P. L., Izquierdo, J., Martínez, F., Perez, R., Vela, A. F., & Vidal, M. R. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*, España: Abreu, Guarga e Izquierdo.
- Baker, A. J. (1985). *Finit Element Computational Fluid Mechanics*: Mc Graw Hill Book Company, Singapur.
- Carmona, P. L., Carmona, P. R., & Rodal, C. E. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1996). *Acueducto Río Yaqui-Guaymas. Dimensionamiento de Dispositivos de control*.
- Carmona, P. L., Carmona, P. R. & Multiestudios Grupo Asociados, S.A. de C.V. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1996). *Informe de avance. Proyecto Ejecutivo del Sistema de Control de Transitorios del Acueducto Río Yaqui-Guaymas*.
- Carmona, P. L., Carmona, P. R. & Análisis Estructural, S.C., Instituto de Ingeniería, UNAM. (1997). *Manual para Seguridad en Acueductos*.
- Carmona, P. L., Carmona, P. G., Carmona, P. R., Pérez, A., Ramos, T. S., García, A. & Sámano, G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1998). *Acueducto El Cuchillo Monterrey. Revisión de la Operación de las Cámaras de Aire y Puesta en Marcha del Sistema con 5 Equipos de Bombeo*.
- Carmona, P. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1998). *Manual del Usuario de la Versión Windows del Sistema de Simulación de Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión*.
- Carmona, P. L., Sánchez, H. A. & Zarco, J. A., Instituto de Ingeniería, UNAM. (2000). *Diagnóstico de las líneas de conducción en los acueductos de Los Cabos, B C S. Análisis del transitorio hidráulico en el rebombeo Twin-Dolphins*.
- Carmona, P. L., Sánchez, H. A. & Zarco, J. A., Instituto de Ingeniería, UNAM. (2001). *Revisión del funcionamiento hidráulico y pruebas en flujo transitorio de los acueductos Sur y Norte de Tepic, Nayarit*.
- Carmona, P. R., Solorio, O. A., Carmona, P. L., Sánchez, H. A. & Sánchez, B. J. L., Instituto de Ingeniería, UNAM. (1986). *Resultados de las mediciones y alternativas de solución al problema de altas presiones por corte de bombeo en el acueducto Río Usapanapa-La Cangrejera*.

- Carmona, P. R., Guarga, F. R., Sánchez, B. J. L., Aguilar, L., & Carmona, P. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1985). *Revisión del Diseño Hidráulico del Acueducto Moctezuma – Puebla*.
- Carmona, P. R. & Aguilar, M. L. (1987). Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión, *Ingeniería Hidráulica en México*, 2(1), 29-52.
- Carmona, P. R. & Carmona, P. L. (1987). Transitorios por Corte de Bombeo, *Ingeniería Hidráulica en México*, 2(3), 53-61.
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A., Guevara, G. Y., Castillo, H. G., Rodal, C. E. & Sámano G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1988). *Informe de los resultados de la campaña de medición en la planta de bombeo No.2 del Sistema Cutzamala*.
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A., Guevara, G. Y., Castillo, H. G., Rodal, C. E. & Sámano G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1988). *Informe de resultados de la campaña de mediciones realizada en el acueducto Río Colorado-Tijuana los días 20 a 25 de septiembre de 1988*.
- Carmona, P. R. & Carmona, P. L. (06, 1988). Hydraulic Transients Caused by Pumping Failure. Models and Comparison Between Numerical Results and Real Measurements, *14th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, Trondheim, Noruega*.
- Carmona, P. R. (1990). Transitorios por Oscilación de Masa en Acueductos a Presión, *Ingeniería Hidráulica en México*, 5(1), 40-51.
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A., Castillo, H. G., Sámano, G. A., Carmona, P. G. & García, J. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1990). *Revisión del Funcionamiento de la Cámara de Aire Diseñada para el Control del Transitorio Hidráulico en la Planta de Rebombeo Las Amalias del Acueducto San Francisco del Rincón – León*.
- Carmona, P. R. & Sánchez, H. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1993). *Selección de válvulas de llenado para los tanques del acueducto Tziquia–Meza de León (bitácora)*.
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A., Rodal, C. E., Carmona, P. G., Sánchez, H. J. A., Carmona, P. L. & Sámano G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1994). *Puesta en Operación del Acueducto El Cuchillo – Monterrey*.
- Carmona, P. R., Rodal, C. E., Sánchez, H. A., Carmona, P. L., Carmona, P. G., Sánchez, H. J. A. & Sámano, G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1994). *Estudio para la Medición de Fenómenos Transitorios en las Plantas de Bombeo No. 1 y 6 del Sistema Cutzamala, Estado de México. Informe Parcial 2*.
- Carmona, P. R., Rodal, C. E., Sánchez, H. A., Carmona, P. L., Carmona, P. G., Sánchez, H. J. A., Estévez, N. & Sámano, G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1995). *Estudio para la Medición de Fenómenos Transitorios en las Plantas de Bombeo No. 1 y 6 del Sistema Cutzamala, Estado de México Informe Final*.

- Carmona, P. R., Rodal, C. E., Sánchez, H. A., Ibarra, F., García, A. & Sámano, G. A., Instituto de Ingeniería, UNAM. (1996). *Proyecto Ejecutivo de los Dispositivos para el Control del Transitorio Hidráulico en el Acueducto González Ortega II - Ucum II - Chetumal, Quintana Roo Primer Informe de avance.*
- Carmona, P. R. (1997). Tecnología para Diseño y Operación de Conducciones a Presión, II *Convención Anual EAS (Empresas de Agua y Saneamiento)*, 1-29.
- Carmona, P. R. & Sánchez, H. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1998). *Proyecto Ejecutivo de Dispositivos de Control de Transitorios para las Plantas de Bombeo del Sistema de Abastecimiento de Agua de Acapulco, Gro.*
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A., Rodal, C. E., Carmona P. G. & Sámano G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1999). *Puesta en servicio de las cámaras de aire de Papagayo II.*
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A. & Zarco, H. J. A. (10, 2000), Método Simplificado para el Predimensionamiento de Cámaras de Aire, *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, International Association of Hydraulic Research*, Córdoba, Argentina.
- Carmona, P. R., Sánchez, H. A. Sánchez, H. J. A., Pérez, M. A. & Flores, O. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (2001). *Mediciones en los equipos de bombeo 3, 4 y 6 del Acueducto Chapala-Guadalajara, realizadas los días 12 y 13 de junio de 2001.*
- Castillo, H. G., Carmona, P. L., Carmona, P. R., Sánchez H. A. & Valencia G. J. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1989). *Revisión del funcionamiento hidráulico y diseño del sistema de control de transitorios del acueducto San Francisco del Rincón – León.*
- Donsky, B. (1961). Complete Pump Characteristics and the Effects of Specific Speeds on Hydraulic Transients. *Journal of Basic Engineering*, 83(4), 685-696.
- Fox, J. A. (1977). *Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks*, London: The MacMillan Press Ltd.
- Fox, P. (1960). *The Solution of Hyperbolic Partial Differential Equations by Difference Methods*. En A. Ralston & H. S. Wilf, *Mathematical Methods for Digital Computers*, 2, (pp. 165- 180). Nueva York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Guarga, F. R., Sánchez, B. J. L., Aguilar, M. L., Carmona, P. R., Solorio, O. A. & Carmona, P. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1984). *Acueducto Chapala – Guadalajara. Diseño Hidráulico.*
- Guarga, F. R., Carmona, P. R. & Aguilar, M. L., (11, 1984). Relación entre Topografía y Dispositivos para el Control de Transitorios en Acueductos. Criterios de Diseño y Presentación de Dos Casos, *XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IARH*, Buenos Aires, Argentina.
- Guarga, F. R., Sánchez, B. J. L., Carmona, P. R. & Aguilar, M. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1985). *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. Fascículo II, Llenado, vaciado y operación estacionaria de las conducciones de agua a presión.*

- Guarga, F. R., Sánchez, B. J. L., Carmona, P. R., Aguilar, M. L., Solorio, O. A., Carmona, P. L., Guevara, G. Y. & Méndez, R. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1985), *Sistema Cutzamala. Revisión del Diseño Hidráulico de sus Acueductos a Presión.*
- Sánchez, H. A., Carmona, P. R., Castillo, H. G., Rodal, C. E., Guevara, G. Y., Valencia, G. J. & Sámano, G. A. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1988). *Informe de los Resultados Obtenidos en las Campañas de Medición en las Plantas de Bombeo 5, 5A y 3 del Sistema Cutzamala.*
- Sánchez, H. A., Carmona, P. R., Castillo, H. G. & Carmona, P. L. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1989). *Análisis del Transitorio Hidráulico en el Tramo PB4-TS5 del Acueducto Río Colorado – Tijuana.*
- Sánchez, H. A., Carmona, P. R., Ramos, T. S. & Sánchez, H. J. Instituto de Ingeniería, UNAM. (1996). *Proyecto ejecutivo de los dispositivos para el control de transitorios hidráulicos en el acueducto González Ortega II – Ucum II – Chetumal, Quintana Roo.*
- Sánchez, H. A., Carmona, P. R. & Rodal, C. E., Instituto de Ingeniería, UNAM. (1997). *Análisis del Transitorio Hidráulico en la Planta de Bombeo Papagayo II.*
- Sánchez, H. A., Carmona, P. L., Sánchez, H. J. & Zarco, H. J. Instituto de Ingeniería, UNAM. (2000). *Análisis del transitorio hidráulico en el bombeo Acueductos No 1 y 2, Los Cabos.*

Anexos

A1 Oscilación de masa

El estudio del transitorio por oscilación de masa es de gran importancia en el análisis del funcionamiento de un sistema de conducción, a través de él se determinan algunas características de su obra civil como el uso de vasos de regulación, el diámetro de torres de oscilación, sus alturas para que no derramen agua o en caso de que se permita se construyan las obras civiles necesarios para encausar el agua derramada. En la Figura A1.1 se muestra el tramo de conducción de un sistema de bombeo en el que después de un cambio en la operación del sistema se presentará un transitorio por oscilación de masa entre los tanques. La Figura A1.2 es el esquema simplificado de una central hidroeléctrica en la que, al suspender la generación, la válvula se cierra para detener el ingreso de agua a las turbinas, debido al cambio de operación del sistema se presenta un transitorio por oscilación de masa entre el embalse y el pozo de oscilación. En la Figura A1.3 se muestra un tanque o torre de oscilación derramando agua.

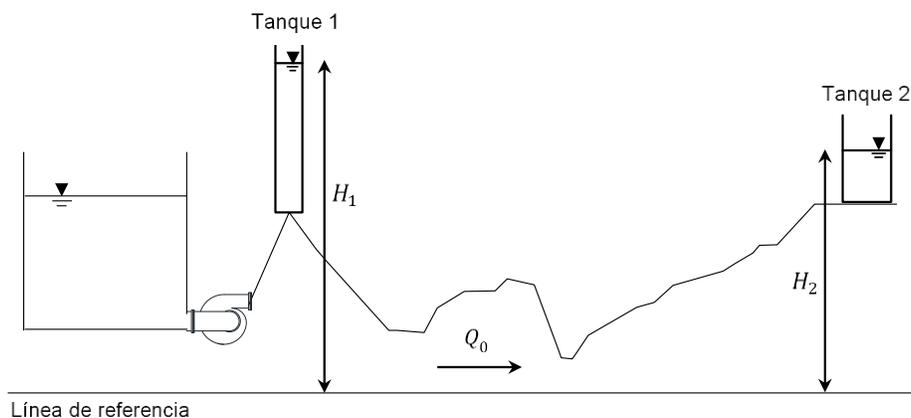


Figura A1.1 Después de un cambio de operación del sistema la columna de agua en la conducción oscila entre los tanques o torres con cargas H_1 y H_2

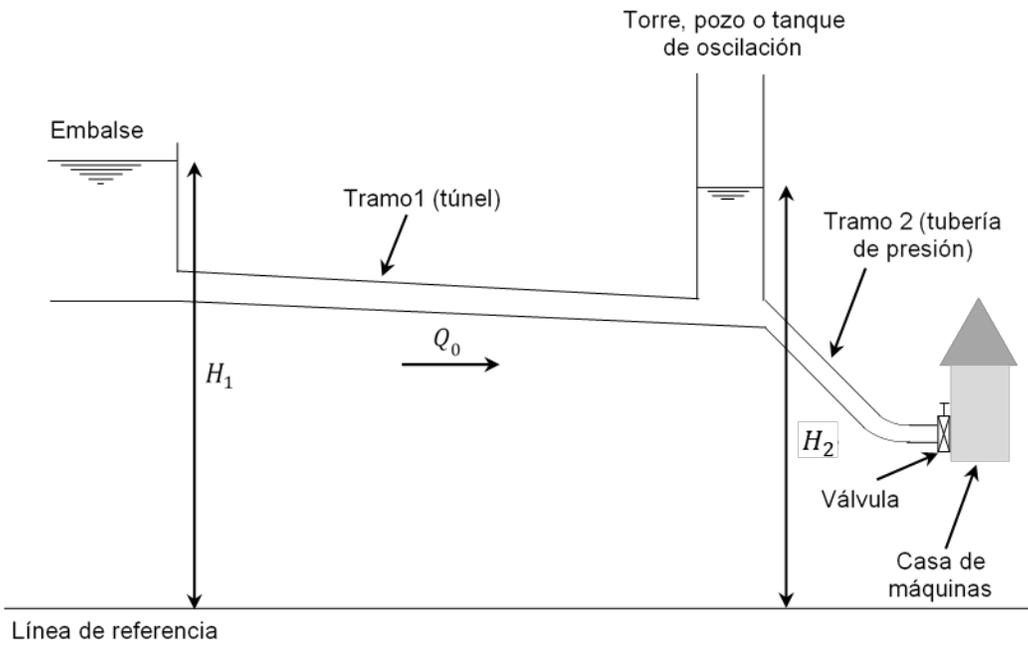


Figura A1.2 Al cerrar la válvula, se presentará un transitorio de oscilación de masa entre el embalse y el pozo



Figura A1.3 Torre de oscilación con agua derramando. Cortesía de Rafael Carmona

A1.1 Modelo matemático de oscilación de masa

El modelo matemático está formado por las ecuaciones que representan la dinámica del agua en la tubería y en la torre de oscilación, para presentarlo, consideremos el caso de la Figura A1.4. En flujo permanente el agua se mueve con velocidad v_0 de izquierda a derecha, en el tiempo $t = 0$ se apaga la bomba y se cierra la válvula, termina la operación en flujo estable e inicia la operación en flujo transitorio. El agua en el tramo 1 se detiene rápidamente (el transitorio en ese tramo no se analizará en este anexo) mientras que en el tramo 2 se desarrolla un transitorio de oscilación de masa. La masa de agua contenida en el tramo 2 (tanque aguas abajo) y el tanque 1 (tanque aguas arriba) oscilará, como se muestra en la Figura A1.5, hasta que la fuerza de fricción entre el agua y la tubería consume la energía del sistema. Por simplicidad, se considerará que el área transversal del tanque 2 es tan grande que la variación del nivel del espejo de agua es tan pequeña que la carga en el tanque 2 puede considerarse constante durante el tiempo que permanece la oscilación de masa.

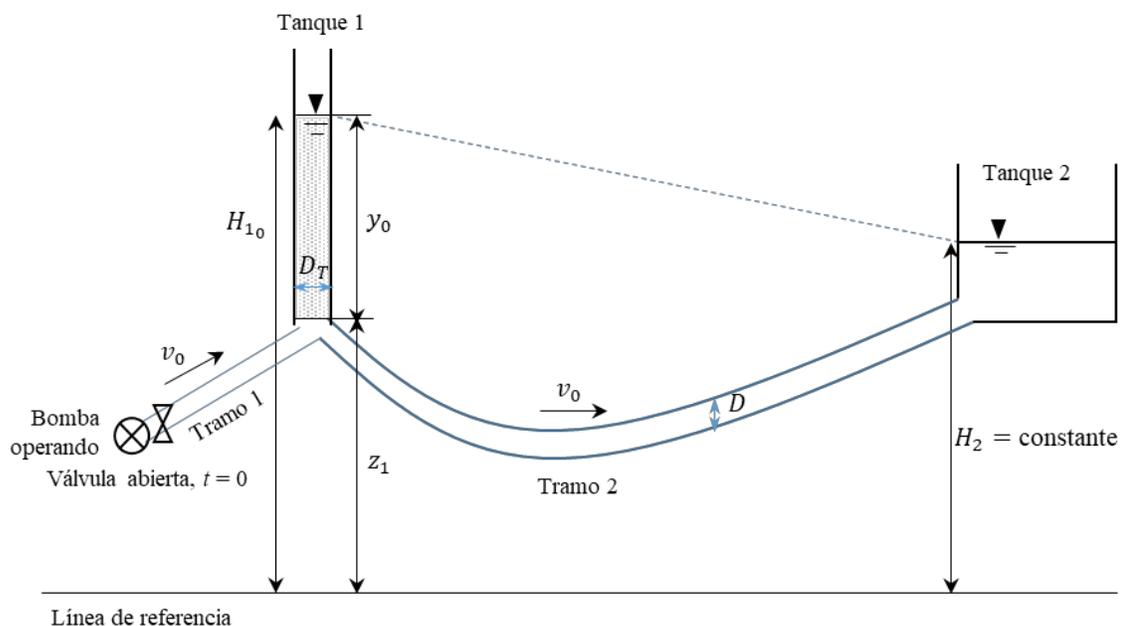


Figura A1.4 En flujo permanente el agua fluye de izquierda a derecha con velocidad constante. Cortesía de Libia Carmona

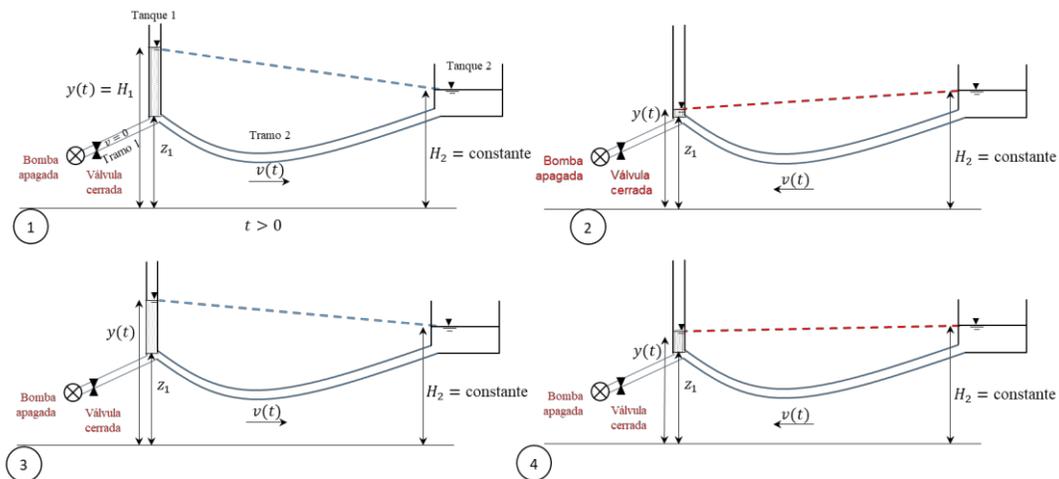


Figura A1.5 Durante la oscilación de masa el espejo del agua en el tanque 1 (tanque aguas arriba) asciende y desciende, en el tanque 2 (tanque aguas abajo) se considerará constante. Cortesía de Libia Carmona

A1.1.1 Ecuación de la dinámica del agua en la tubería

El estudio de los transitorios de oscilación de masa se realiza considerando el agua incompresible y la tubería rígida, bajo estas condiciones, la dinámica del agua en el tramo 2 de las Figuras A1.4 y A1.5 se describe con la Ecuación A1.1.

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{fL}{D} \frac{v|v|}{2g} + H_2 - y = 0 \quad (\text{A1.1})$$

donde

y es la carga piezométrica en el tanque 1 (tanque aguas arriba), en m

H_2 es la carga piezométrica en el tanque 2 (tanque aguas abajo), en m

v es la velocidad del agua en la tubería, en m/s

D es el diámetro de la tubería que une al tanque 1 con el tanque 2, en m

L es la longitud de la tubería que une el tanque 1 con el tanque 2, en m

f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach de la tubería entre el tanque 1 y el tanque 2, adimensional

g es la aceleración de la gravedad, en m/s²

t es el tiempo, en s

Existen varias expresiones para determinar el factor de fricción para flujos turbulentos, como lo son en los sistemas de bombeo, entre ellas la propuesta por Swamee (1993), Ecuación A1.2.

$$f = 1.325 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad \text{para } R_e > 4000 \quad (\text{A1.2})$$

donde

$R_e = vD/\vartheta$ es el número de Reynolds, adimensional

v es la velocidad del fluido, en m/s

ϑ es la viscosidad del fluido, en m²/s

ε es el promedio de la rugosidad de la tubería, en m

D es el diámetro de la tubería, en m

A1.1.2 Ecuación de la dinámica del agua en el tanque 1

Cuando se desprecia la fuerza de interacción entre el agua y el tanque y el efecto inercial de la masa de agua en el tanque, la dinámica del agua en el tanque 1 (Figura A1.4) está dada por la Ecuación A1.3.

$$\frac{dy}{dt} = v_T \quad (\text{A1.3})$$

Cuando el tanque 1 recibe o entrega agua ($v_T \neq 0$), se cumple la Ecuación A1.4.

$$A_T v_T = A v \quad (\text{A1.4})$$

donde

v_T es la velocidad del agua en el tanque 1, en m/s

A_T es el área transversal del tanque 1, en m²

A es el área transversal de la tubería que une el tanque 1 con el tanque 2, en m²

A partir de las ecuaciones A1.2 y A1.4, considerando que el nivel del agua en el tanque 1 disminuye cuando la velocidad del agua es positiva (ver Figura A1.6) y despejando la velocidad del agua en la tubería, se obtiene la Ecuación A1.5.

$$v = - \frac{A_T}{A} \frac{dy}{dt} \quad (\text{A1.5})$$

Al sustituir la Ecuación A1.5 y su derivada con respecto al tiempo en la Ecuación A1.1, se obtiene la Ecuación A1.6 que al simplificarla puede escribirse como la Ecuación A1.7.

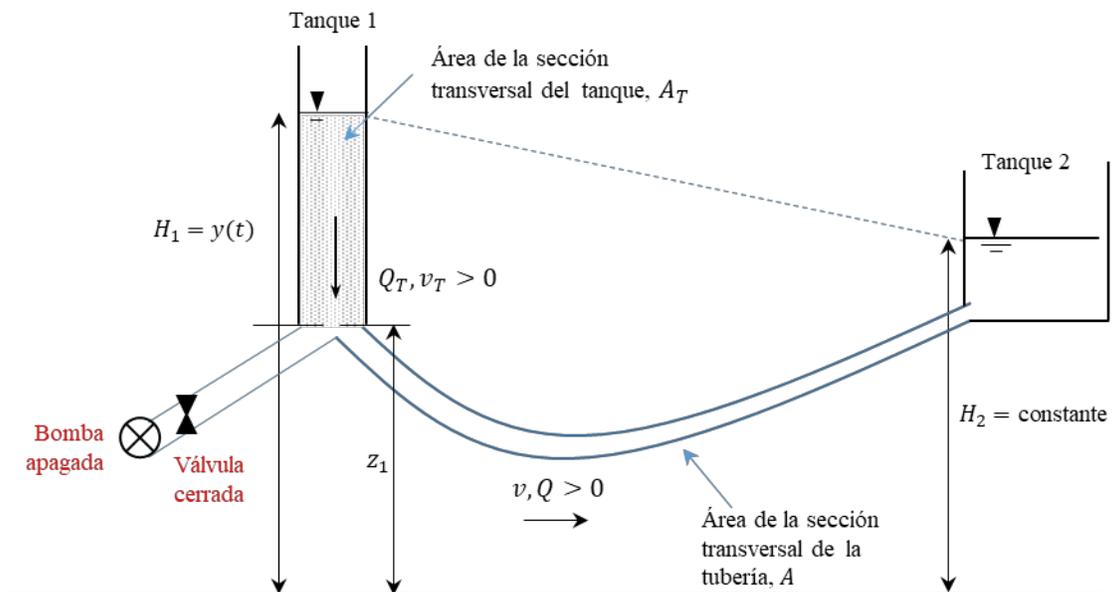


Figura A1.6 Durante la oscilación de masa, cuando la velocidad del agua en la conducción es positiva, el tanque 1 entrega agua a la tubería y su nivel disminuye. Cortesía de Libia Carmona

$$-\frac{L A_T}{g A} \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{f L}{g} \frac{1}{2D} \left(\frac{A_T}{A} \right)^2 \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt} - (y - H_2) = 0 \quad (\text{A1.6})$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{f A_T}{2D A} \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt} + \frac{g A}{L A_T} (y - H_2) = 0 \quad (\text{A1.7})$$

Al sustituir las constantes definidas en las ecuaciones A1.8, la Ecuación A1.7 puede escribirse como la Ecuación A1.9.

$$b = \frac{g}{L} \frac{A}{A_T} \quad c = \frac{f}{2D} \frac{A_T}{A} \quad d = \frac{g}{L} \frac{A}{A_T} H_2 \quad (\text{A1.8})$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + by + c \left| \frac{dy}{dt} \right| \frac{dy}{dt} = d \quad (\text{A1.9})$$

La Ecuación A1.9 es una ecuación diferencial no lineal de segundo orden sin solución analítica, a menos que $c = 0$, es decir, cuando las pérdidas se desprecian. En ese caso, la Ecuación A1.9 se reduce a la Ecuación A1.10, a este se le llama caso ideal.

$$\frac{d^2y}{dt^2} + by = d \quad (\text{A1.10})$$

Realizando el cambio de variable $u = y - d/b$ en la Ecuación A1.10, se obtiene la Ecuación A1.11, la cual corresponde a la de un oscilador armónico cuya solución está dada por la Ecuación A1.12.

$$\frac{d^2u}{dt^2} + bu = 0 \quad (\text{A1.11})$$

$$u = M \text{ sen}(\omega t + \emptyset) \quad (\text{A1.12})$$

donde

$$M = v_0 \sqrt{\frac{lA}{gA_T}} \quad (\text{A1.13})$$

$$\omega = \sqrt{\frac{gA}{lA_T}} \quad (\text{A1.14})$$

M es la mitad de la amplitud de la oscilación, en m

ω es la frecuencia de la oscilación, en 1/s

\emptyset es la fase de la oscilación, adimensional

El periodo de la oscilación (T) es el tiempo que tarda en ocurrir una oscilación completa, se calcula con la Ecuación A1.15.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{A1.15})$$

Al realizar el cambio de variable y debido a que $d/b = H_2$, la amplitud de la oscilación ahora está referida al nivel del espejo de agua en el tanque 2.

La solución que se obtiene con la Ecuación A1.12 es de gran utilidad porque a partir de las dimensiones del tanque de oscilación que se obtienen con ella, se puede iniciar el proceso de optimización de las mismas.

La solución del modelo matemático (ecuaciones A1.1 y A1.5) de mayor interés es para el caso en el que se consideran las pérdidas en el sistema, ésta se obtiene numéricamente que involucra un proceso iterativo. Uno de los métodos muy usado es el de Euler, en donde las derivadas temporales de la velocidad y la carga se aproximan a un cociente de diferencias finitas, de tal forma que la aproximación a la Ecuación A1.5 queda escrita como la Ecuación A1.16 y la de la Ecuación A1.1 como la A1.17.

El proceso iterativo comienza con $t = 0$, para el cual el valor de las variables y y v corresponden a las del estado permanente.

$$y(t + \Delta t) = y(t) - \Delta t \frac{A}{A_T} v(t) \quad (\text{A1.16})$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) - \Delta t \frac{f}{2D} v(t)|v(t)| - \Delta t \frac{g}{L} (H_2 - y(t + \Delta t)) \quad (\text{A1.17})$$

donde

Δt es el intervalo de integración, en s

Considerando un sistema como el de la Figura A1.7 en donde se genera un transitorio porque la válvula ubicada en la frontera aguas abajo de la conducción se cerró. Al estar impedido el paso del agua a través de la válvula cerrada, ésta se dirige hacia el pozo, lo que

produce que el nivel del agua aumente. Llegará un momento en el que la energía en el pozo será mayor que en el embalse, entonces el sentido del flujo será negativo (del pozo hacia el embalse), el nivel del agua en el pozo descenderá, cuando este nivel sea menor que el del embalse el flujo en la conducción volverá a ser positivo, el nivel del agua en el pozo volverá a incrementarse y permanecerá la oscilación de la masa de agua durante algunos minutos hasta que la energía del sistema se disipe. En el tramo 2, se presenta un transitorio por golpe de ariete en donde el flujo se detiene en algunos segundos.

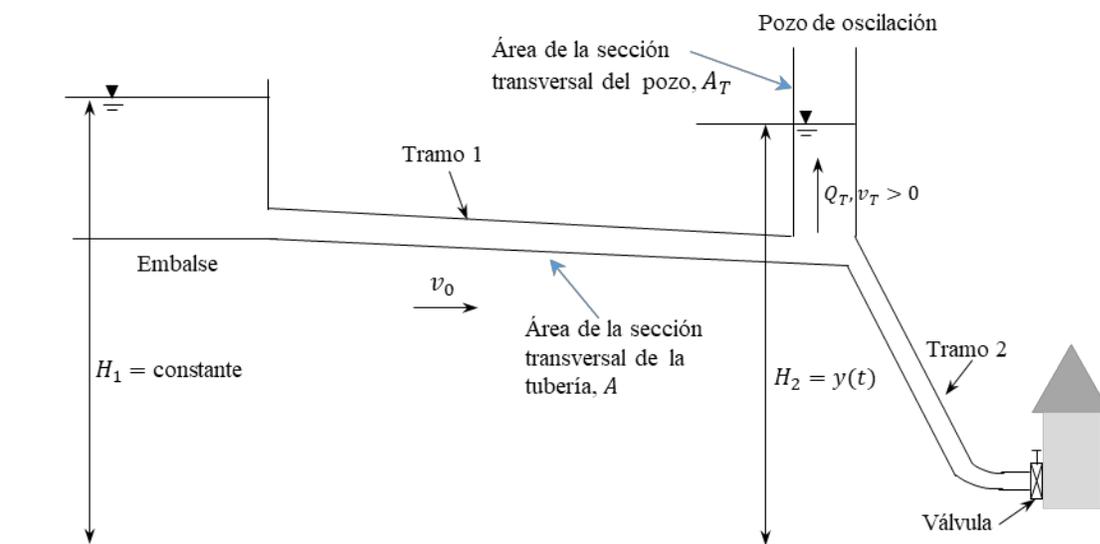


Figura A1.7 Durante la oscilación de masa, cuando la velocidad del agua en la conducción es positiva, el pozo de oscilación recibe agua y su nivel aumenta

Debido a que durante el transitorio de oscilación de masa que se presenta en el tramo 1 de la Figura A1.7, el nivel del agua en el pozo de oscilación se incrementa cuando la velocidad es positiva, la Ecuación A1.4 deberá escribirse como la Ecuación A1.18 y la Ecuación A1.17 ahora toma la forma de la Ecuación A1.19.

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t \frac{A}{A_T} v(t) \quad (\text{A1.18})$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) - \Delta t \frac{f}{2D} v(t)|v(t)| - \Delta t \frac{g}{L} (y(t + \Delta t) - H_1) \quad (\text{A1.19})$$

A2 Golpe de ariete

Los transitorios rápidos o de golpe de ariete se caracterizan porque los cambios en la presión y velocidad del fluido ocurren de manera abrupta, en este estado de operación es cuando se presentan los valores extremos de la presión capaces de colapsar o reventar las tuberías. El arranque de equipos de bombeo y el paro del bombeo por corte de la energía eléctrica, así como la apertura o cierre súbito de válvulas durante la operación estacionaria en sistemas de hidrogenación y bombeo, son ejemplos de eventos que generan este tipo de transitorios.

Como consecuencia de un golpe de ariete, en el interior de algunas secciones de la conducción pueden presentarse:

- Sobrepresiones, presión mayor que la de operación en régimen estacionario. Si ésta es superior a la resistencia nominal de la tubería, la conducción está en riesgo de falla o rotura por sobrepresión.
- Depresiones, presión menor que la presión atmosférica. Las depresiones favorecen el ingreso de aire a la conducción, pueden causar tanto que las tuberías colapsen como que se presente el fenómeno de separación de columna.

Las depresiones favorecen que el aire mezclado en el agua se separe del agua, se aglomere y forme cavidades de aire, las cuales pueden contener vapor de agua, en caso de que se hubiera alcanzado la presión de vapor del agua, la columna de agua pierde su continuidad presentándose la llamada separación de columna.

Cuando el origen del transitorio es un paro súbito del bombeo, la dinámica de la bomba queda bajo la acción del flujo transitorio y la inercia de las masas en rotación del grupo motor-bomba, motivo por el que es muy importante evaluar correctamente el momento de inercia del conjunto motor-bomba.

En acueductos con pendiente ascendente (la elevación del tanque de entrega es mayor que la de la planta de bombeo) a los pocos segundos de haberse suspendido el bombeo el sentido del flujo se invierte. Mientras no cierren las válvulas que lo eviten, el agua entrará a

las bombas haciéndolas girar en sentido inverso pudiendo alcanzar velocidades mayores que las de diseño. Las partes que giran serán sometidas a esfuerzos excesivos debidos a la fuerza centrífuga, la integridad estructural de estos elementos se verá seriamente comprometida.

Por lo señalado anteriormente es evidente la importancia que tiene conocer los valores máximos y mínimos de la presión en el interior de las tuberías y la velocidad negativa de la bomba como consecuencia de un golpe de ariete. Las presiones se determinan a través del modelo de golpe de ariete y la velocidad de la bomba a través del modelo que representa su dinámica.

A2.1 Modelo matemático del golpe de ariete

En el modelo de golpe de ariete se considera que el fluido es compresible y el material con el que están fabricadas las tuberías es elástico.

Los cambios en la presión del fluido que se presentan después de perturbar rápidamente la velocidad del flujo se transmiten como ondas de presión con una velocidad finita a la que se le llama celeridad, la cual se determina como se indica a continuación.

La celeridad depende principalmente de las características elásticas del fluido y del material con el que está fabricada la tubería, así como, la relación espesor-diámetro y la forma como está sujeta, debido a que de ello depende la libertad para expandirse longitudinal y axialmente. Para la forma más común de la instalación de la tubería, totalmente anclada y con juntas de expansión, la celeridad se determina con la Ecuación A2.1, para otros tipos de sujeción se puede consultar en Cafaggi, Rodal & Sánchez (2016), Chaudhry (1979) y Wylie & Streeter (1993).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{E_V}{\rho}}}{\sqrt{1 + E_V \frac{D}{eE_t}}} \quad (\text{A2.1})$$

donde

a es la celeridad, en m/s

D es el diámetro de la tubería, en m

E_t es el módulo de elasticidad del material de la tubería, en N/m²

e es el espesor de la tubería, en m

E_V es el módulo de elasticidad volumétrica del agua, en N/m^2
 ρ es la densidad del agua, en kg/m^3

Mientras más rígidos son los materiales el módulo de elasticidad es mayor, entonces, si se considera que el módulo de elasticidad de tuberías totalmente rígidas es infinito, el denominador de la Ecuación A2.1 es igual a uno, por lo que para tuberías rígidas la celeridad está dada por la Ecuación A2.2.

$$a = \sqrt{\frac{E_V}{\rho}} \quad (\text{A2.2})$$

La celeridad de la onda de presión en una tubería rígida que conduce agua a 20°C ($E_V = 2.2 (10^9) \text{ N/m}^2$ y $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$) es 1484.5 m/s , cuando el agua está a 50°C ($E_V = 2.3 (10^9) \text{ N/m}^2$ y $\rho = 988.1 \text{ kg/m}^3$) es 1525.68 m/s , por lo que, en el sistema TransDocencia la celeridad máxima que se permite es 1530 m/s .

El hecho de que el cambio en la presión del fluido se transmita a través de una onda que se propaga dentro de la conducción significa que la presión en el interior de la tubería va cambiando conforme avanza esa onda de presión. Cuando en un sistema como el de la Figura A2.1 deja de operar súbitamente la bomba, inmediatamente aguas abajo de la bomba la presión disminuye, en ese mismo instante la presión en la mitad de la conducción o en cualquier otro sitio, no ha ocurrido ningún cambio.

Con la finalidad de entender lo que sucede en el interior de la conducción cuando se suspende súbitamente el bombeo, se presenta el sistema de la Figura A2.1 en el que se hacen las siguientes consideraciones: i) el área del tanque de descarga lo suficientemente grande de tal forma que la carga permanece constante durante el transitorio, ii) la válvula en la descarga de la bomba cierra inmediata e instantáneamente después del paro de la bomba, iii) la perturbación de la presión se transmite con celeridad a , iv) se desprecian las pérdidas de energía debidas a la fricción y v) en flujo permanente la carga es H_o y el gasto Q_o .

De la Figura A2.2 a la Figura A2.9 se muestra en el plano posición-tiempo los cambios de presión en el interior de la tubería conforme se propaga la onda de presión, en la

parte inferior se indican los cambios en la presión y en el diámetro de la conducción debidos al paso de la onda de presión. La notación es la siguiente: longitud de la tubería: l , diámetro de la tubería D , carga en flujo permanente: H_0 , variación de la carga: ΔH , variación del diámetro de la tubería δD , velocidad de propagación de la onda de presión o celeridad: a . Cabe recordar que se ha considerado $f = 0$.

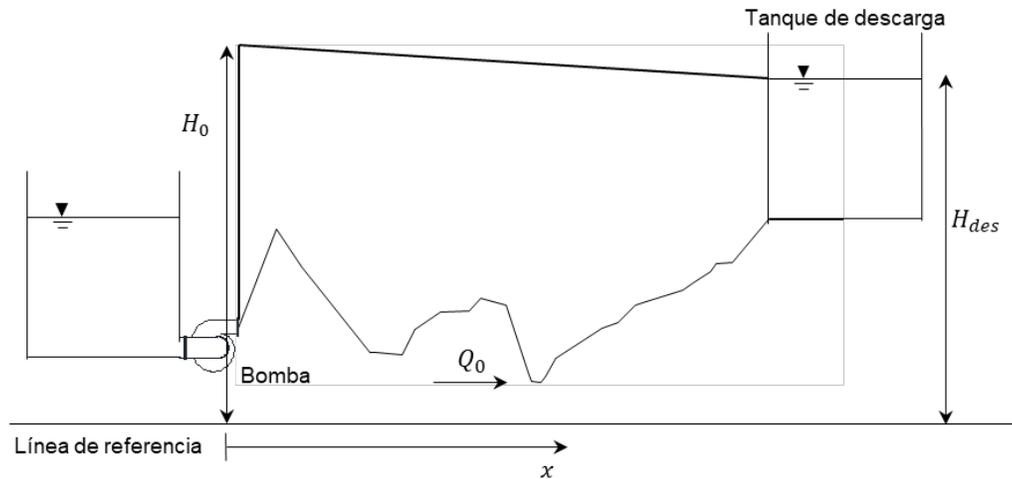


Figura A2.1 Después de un paro súbito del bombeo se genera una onda de baja presión aguas abajo de la bomba que se transmite hacia la descarga (Carmona, P. L., Castillo, H. G. & Carmona, P. R., 2019)

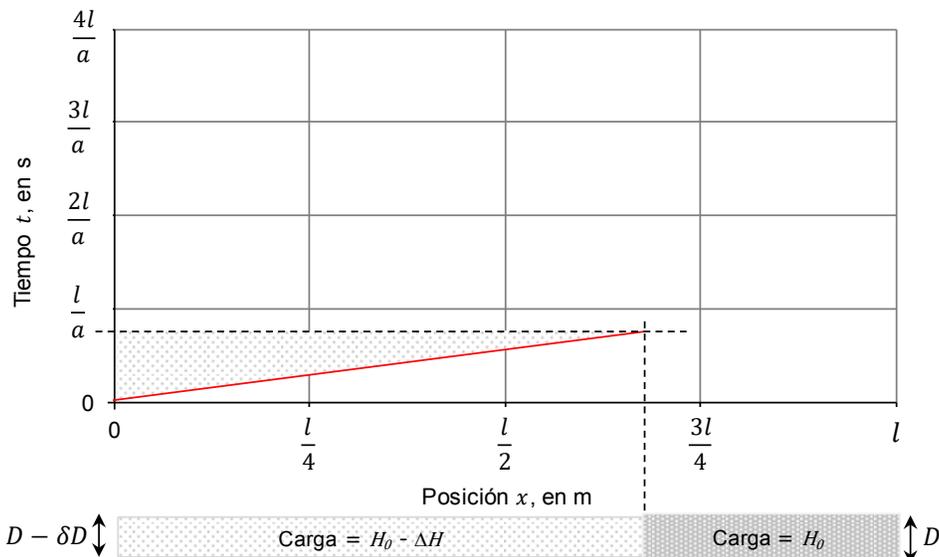


Figura A2.2 En $t = 0$, se suspende súbitamente el bombeo y se cierra inmediata e instantáneamente la válvula de descarga. Inmediatamente aguas abajo de la bomba ($x = 0$) se genera una onda de baja presión que se propaga hacia el tanque de descarga a través del agua con celeridad a , el diámetro de la tubería el disminuye (Carmona *et al.*, 2019)

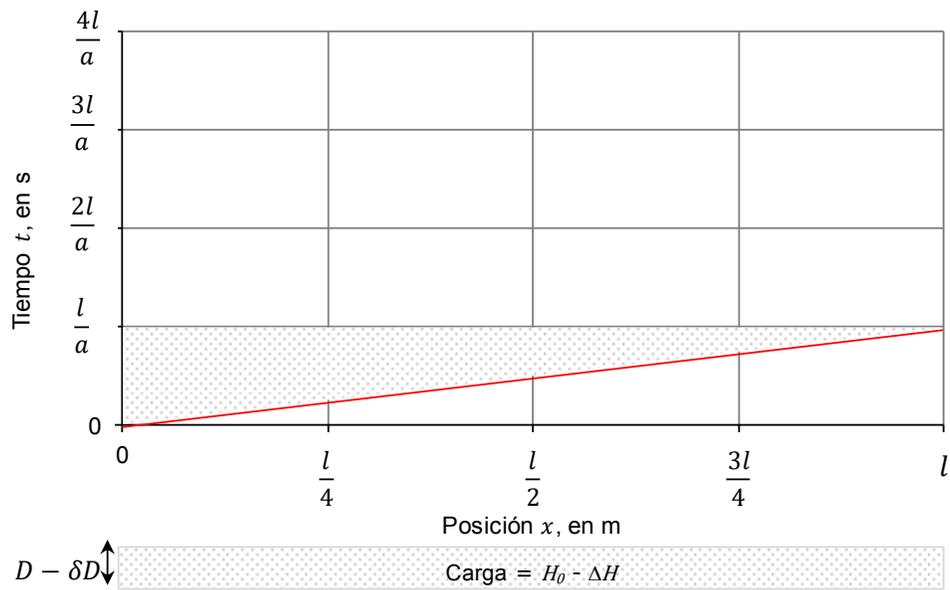


Figura A2.3 En $t = l/a$, la onda de baja presión incide sobre el tanque de descarga con carga constante, la tubería está sometida a subpresión (Carmona *et al.*, 2019)

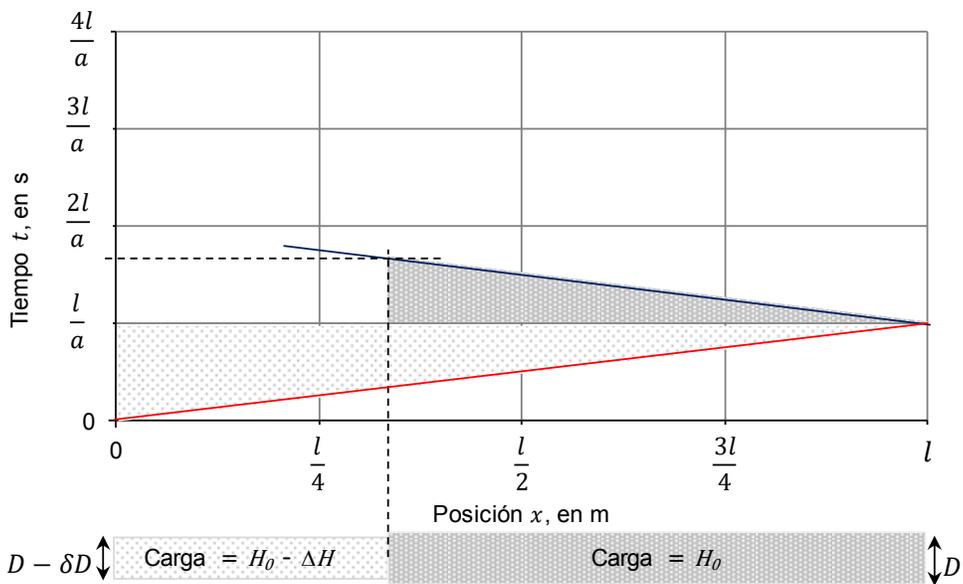


Figura A2.4 En $t = l/a$, la onda que incidió sobre el tanque con carga constante se refleja como onda de alta presión. Se impone la carga del tanque (se dice que hay un nodo de presión). Entre $t = l/a$ y $t = 2l/a$, se restablece la presión que había en flujo permanente (Carmona *et al.*, 2019)

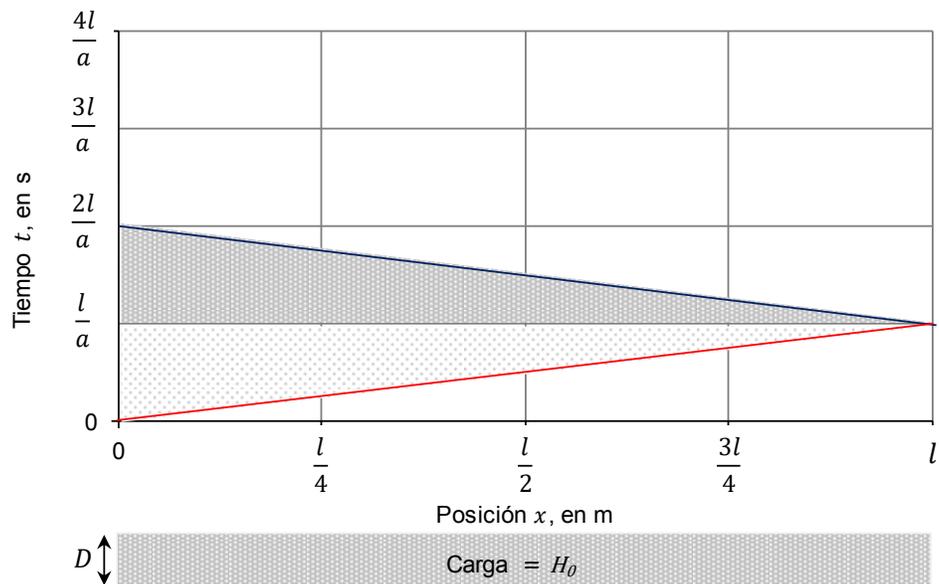


Figura A2.5 En $t = 2l/a$ la onda de alta presión incide sobre la válvula cerrada, durante un instante las condiciones del sistema son similares a las de flujo permanente (Carmona *et al.*, 2019)

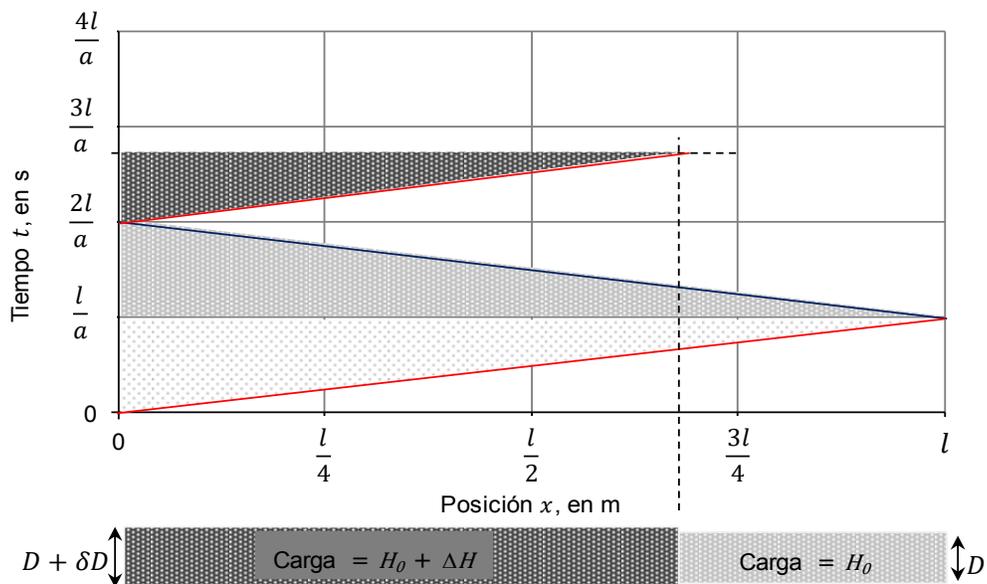


Figura A2.6 En $t = 2l/a$ la onda de alta presión que incidió sobre la válvula completamente cerrada se refleja como una onda de alta presión que se transmite hacia el tanque de descarga aumentando la presión en la tubería, como se indica en la parte inferior de la figura (Carmona *et al.*, 2019)

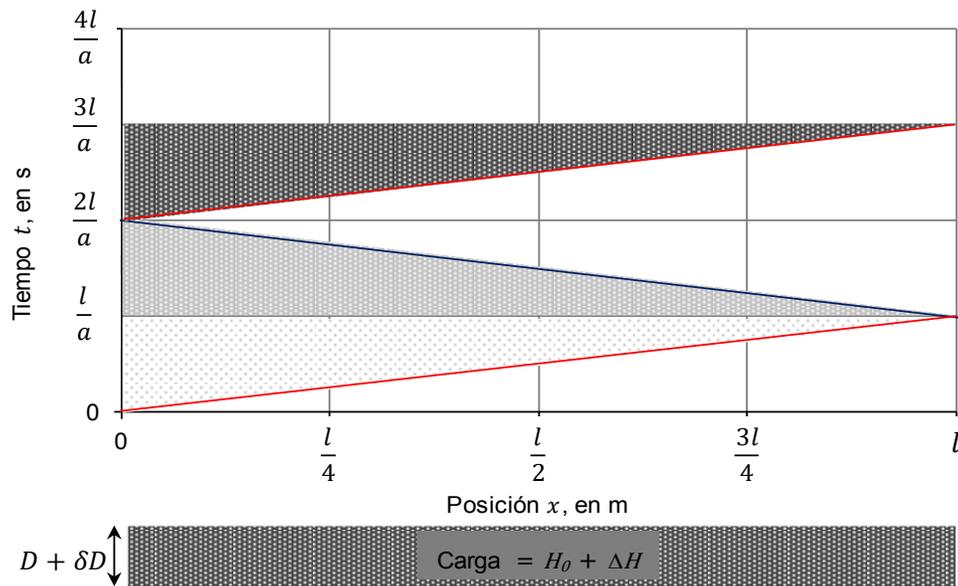


Figura A2.7 En $t = 3l/a$, la onda de alta presión incide sobre el tanque de descarga, toda la tubería está sometida a sobrepresión (Carmona *et al.*, 2019)

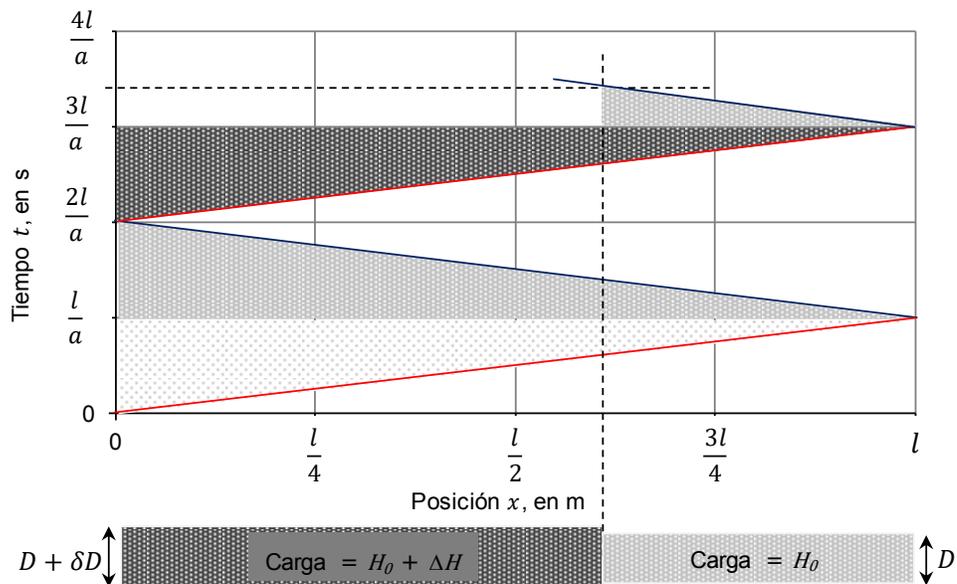


Figura A2.8 En $t = 3l/a$ la onda de alta presión que incidió sobre el tanque de carga constante, se refleja como una de baja presión de magnitud impuesta por la carga del tanque. Entre $t = 3l/a$ y $t = 4l/a$, se restablece la presión del flujo permanente (Carmona *et al.*, 2019)

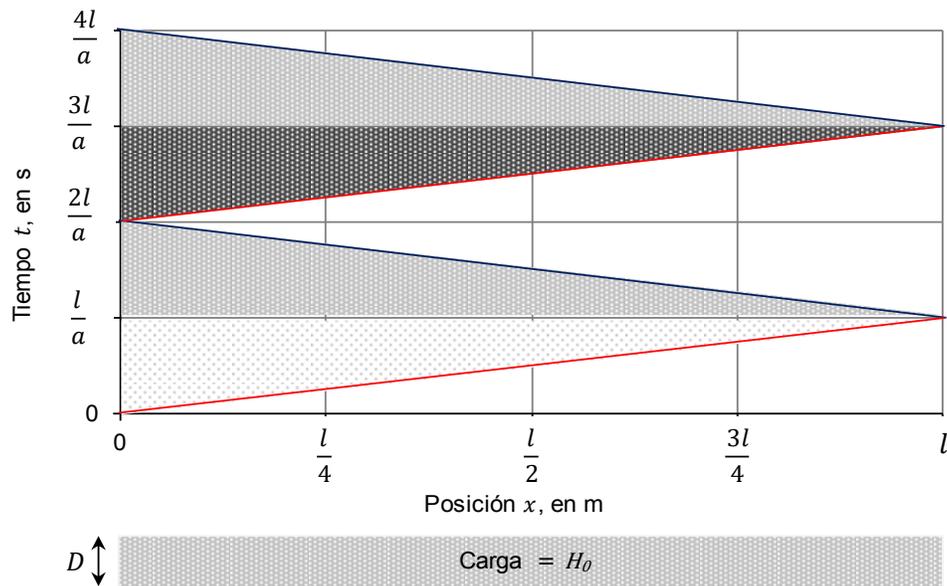


Figura A2.9 En $t = 4l/a$, la onda de baja presión incide sobre la válvula cerrada, se completa el periodo o ciclo de la onda de presión, durante un instante las condiciones del sistema son similares a las de flujo permanente (Carmona *et al.*, 2019)

En $t = 4l/a$, se concluye el primer ciclo de la onda de presión, a este tiempo se le llama periodo, Ecuación A2.3.

$$T = \frac{4l}{a} \quad (\text{A2.3})$$

donde

T es el periodo de la onda de presión, en s

l es la longitud de la tubería, en m

En los comentarios anteriores únicamente se ha hecho referencia a los cambios de la presión, sin embargo, al haber cambios en la presión también los hay en la velocidad del agua y por tanto en el gasto. En la Figura A2.10 se muestra para un intervalo de tiempo igual a dos periodos de la onda de presión, el cambio de la carga a lo largo de la conducción y en la Figura A2.11 la variación del gasto. En ambas se ha considerado un sistema sin pérdidas.

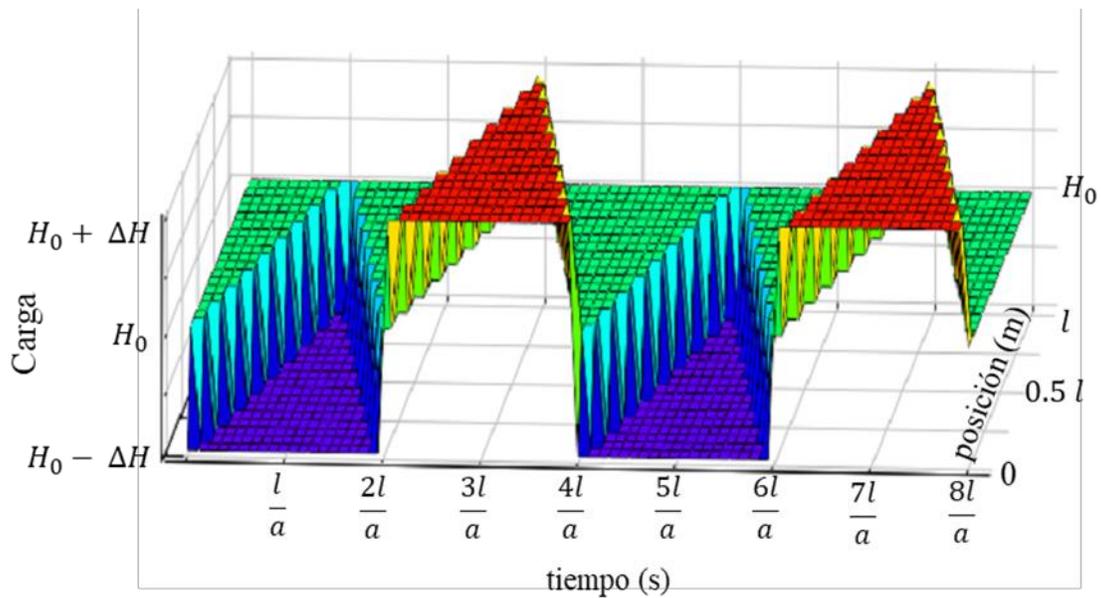


Figura A2.10 Cambio de la carga en función del tiempo y la posición. Cortesía de Libia Carmona

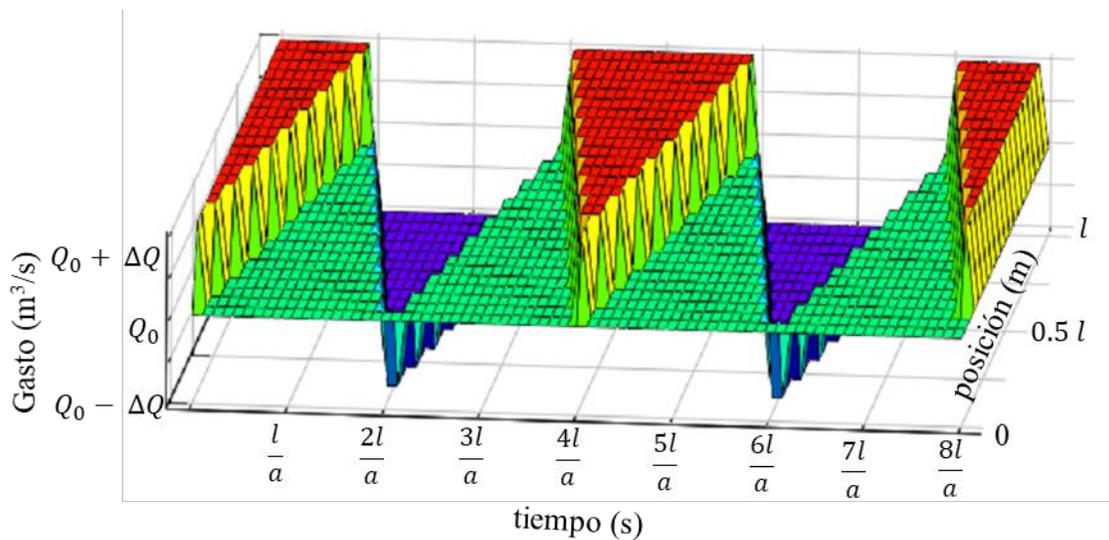


Figura A2.11 Cambio del gasto en función del tiempo y la posición. Cortesía de Libia Carmona

Las relaciones entre la carga y el gasto en función de la posición y el tiempo se obtienen a través del modelo de golpe de ariete, en el que se considera la tubería elástica y el fluido compresible, las ecuaciones que lo determinan son la ecuación dinámica (Ecuación A2.4) y la de continuidad (Ecuación A2.5), el desarrollo para obtenerlas puede consultarse en Gurga, Sánchez, Carmona & Aguilar (1985).

En el sistema de ecuaciones A2.4 y A2.5 hay dos variables independientes, la posición (x) y el tiempo (t), y dos variables dependientes, la carga (H) y el gasto (Q).

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{f}{2gD} \frac{Q|Q|}{A^2} = 0 \quad (\text{A2.4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (\text{A2.5})$$

El área transversal de la conducción (A) y el diámetro (D) son características de la conducción, la celeridad (a) además, depende de las características del fluido y del material de fabricación de la tubería (Ecuación A2.1), el factor de fricción (f) varía con el número de Reynolds sin embargo, en el estado transitorio pudiera considerarse constante. Todos los parámetros mencionados son invariantes en el tiempo, pero pueden cambiar a lo largo de la conducción porque, en general, las conducciones de agua están formadas por tuberías o tramos de distintas características.

Las ecuaciones A2.4 y A2.5 forman un sistema de ecuaciones hiperbólicas de primer orden sin solución analítica, la solución se obtiene a través de métodos numéricos, en el sistema TransDocencia se utiliza el método de las características.

A2.2 Método de las características

A través del método de las características, el sistema de ecuaciones A2.4 y A2.5 se transforma en el sistema de ecuaciones desacoplado con derivadas totales en el tiempo determinado por las ecuaciones A2.6 y A2.7. En Guarga et al. (1985) se presenta el desarrollo para pasar de un sistema al otro.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{cuando} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (\text{A2.6})$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{cuando} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (\text{A2.7})$$

Mientras que las ecuaciones A2.4 y A2.5 son válidas en todo el espacio y el tiempo, las ecuaciones A2.6 y A2.7 únicamente son válidas en las regiones del espacio y el tiempo que satisfacen $dx/dt = \pm a$. Estas regiones son el conjunto de rectas en el plano x, t señaladas en las Figuras A2.10 y A2.11 que dividen al plano en las zonas perturbadas por el paso de la onda de presión de las zonas por las que aún no han sido perturbadas, a estas rectas se les llama rectas características, la recta con pendiente positiva es la característica positiva y la de pendiente negativa la característica negativa, en las Figuras A2.2 a A2.9 las características positivas son las rectas de color rojo y las características negativas son las de color azul.

Al definir las constantes A2.8 y A2.9 y escribir las ecuaciones A2.6 y A2.7 en diferencias finitas, estas últimas toman la forma de las ecuaciones A2.10 y A2.11, respectivamente.

$$c_a = \frac{gA}{a} \quad (\text{A2.8})$$

$$c_f = \frac{f\Delta t}{2DA} \quad (\text{A2.9})$$

$$\begin{aligned} \frac{Q(x, t + \Delta t) - Q(x - \Delta x, t)}{\Delta t} + c_a \frac{H(x, t + \Delta t) - H(x - \Delta x, t)}{\Delta t} \\ + c_f Q(x - \Delta x, t)|Q(x - \Delta x, t)| = 0 \end{aligned} \quad (\text{A2.10})$$

$$\begin{aligned} \frac{Q(x, t + \Delta t) - Q(x + \Delta x, t)}{\Delta t} - c_a \frac{H(x, t + \Delta t) - H(x + \Delta x, t)}{\Delta t} \\ + c_f Q(x + \Delta x, t)|Q(x + \Delta x, t)| = 0 \end{aligned} \quad (\text{A2.11})$$

Usando la notación definida en las ecuaciones A2.12 a A2.14 donde F representa cualquiera de las variables Q o H , definiendo los parámetros c_p y c_n como se indica en las ecuaciones A2.15 y A2.16, las ecuaciones A2.10 y A2.11 se transforman, respectivamente, en las ecuaciones A2.17 (llamada ecuación de la característica positiva) y A2.18 (ecuación de la característica negativa).

$$F_P = F_{x_{t+\Delta t}} = F(x, t + \Delta t) \quad (\text{A2.12})$$

$$F_A = F(x - \Delta x, t) \quad (\text{A2.13})$$

$$F_B = F(x + \Delta x, t) \quad (\text{A2.14})$$

$$c_p = Q_A + c_a H_A - c_f Q_A |Q_A| \quad (\text{A2.15})$$

$$c_n = Q_B - c_a H_A - c_f Q_B |Q_B| \quad (\text{A2.16})$$

$$Q_P = c_p - c_a H_P \quad (\text{A2.17})$$

$$Q_P = c_n + c_a H_P \quad (\text{A2.18})$$

donde

F_P es el valor de la variable F en la posición x de la conducción en el tiempo $t + \Delta t$

F_A es el valor de la variable F en la posición $x - \Delta x$ de la conducción en el tiempo t

F_B es el valor de la variable F en la posición $x + \Delta x$ de la conducción en el tiempo t

c_p es el parámetro de la característica positiva, en m^3/s

c_n es el parámetro de la característica negativa, en m^3/s

El análisis de los transitorios se realiza a través de un proceso iterativo en el tiempo con un incremento de integración Δt y discretizando a la conducción en secciones de cálculo o puntos de cálculo distantes Δx entre sí, la primera sección está en $x = 0$ y la última en $x = L$ donde L es la longitud de la conducción.

El incremento de integración Δt y la distancia entre los puntos de cálculo Δx están relacionados a través de la celeridad $\Delta x / \Delta t = \pm a$. En la Figura A2.12 se muestra la malla de cálculo del método de las características.

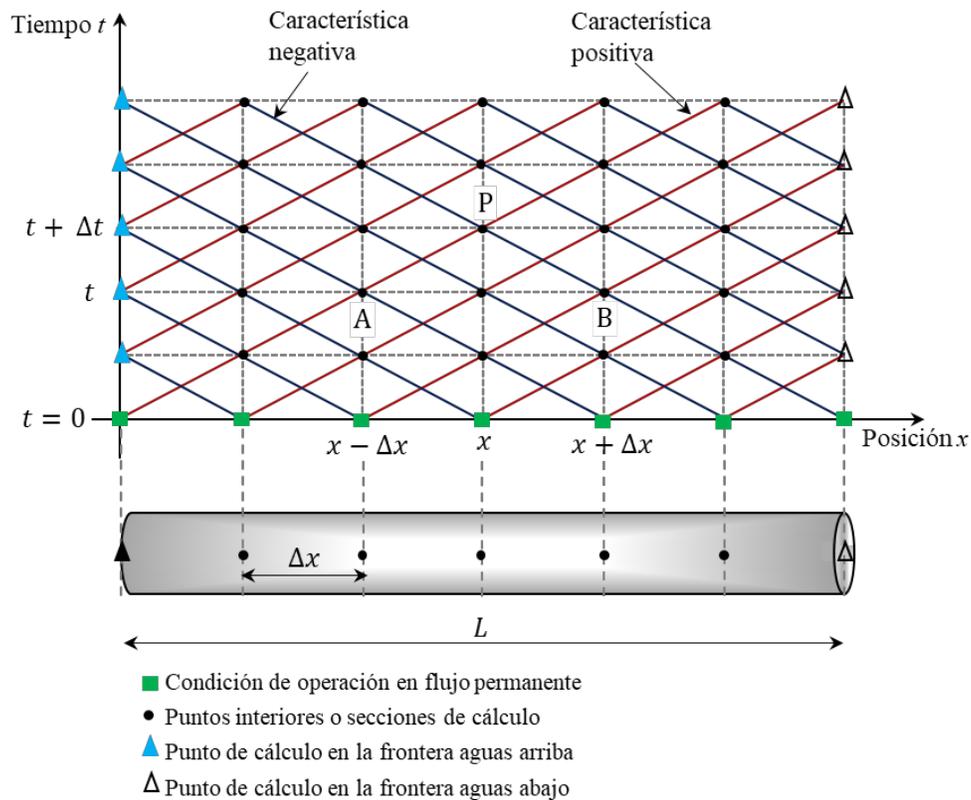


Figura A2.12 Malla de cálculo del método de las características

Para determinar el estado del flujo en el tiempo $t + \Delta t$ debe conocerse el estado del flujo en el tiempo t . El proceso iterativo con el que se calcula el flujo transitorio inicia con la condición de operación en flujo permanente.

En los puntos interiores de la malla de cálculo (Figura A2.12) el estado del flujo en el tiempo $t + \Delta t$ se determina resolviendo el sistema de ecuaciones lineales formado por las ecuaciones A2.17 y A2.18 (dos ecuaciones con dos incógnitas), para el punto de cálculo ubicado en la posición x , el parámetro c_p se calcula con la carga y el gasto del punto $x - \Delta x$ que tenía en el tiempo t y el parámetro c_n se calcula con la carga y el gasto del punto $x + \Delta x$ que tenía en el tiempo t .

En el punto de cálculo ubicado en la frontera aguas arriba ($x=0$) únicamente puede calcularse el parámetro c_n porque no hay puntos de cálculo a su izquierda, por lo que solo existe la Ecuación A2.18, la cual tiene dos incógnitas, el sistema se completa con la condición hidráulica que impone la frontera.

En el punto de cálculo ubicado al final de la conducción ($x = L$) únicamente puede calcularse el parámetro c_p porque no hay puntos de cálculo a su derecha, por lo que solo existe la Ecuación A2.17, la cual tiene dos incógnitas, el sistema se completa con la condición hidráulica que impone la frontera aguas abajo.

La presión en el interior de la tubería que se presenta durante los transitorios por golpe de ariete puede alcanzar valores lo suficientemente bajos como para generar la separación de la columna líquida, como se muestra en la Figura A2.13 o colapsar tuberías como lo ocurrido en la Figura A2.14 o presiones lo suficientemente grandes como para reventarlas, Figura A2.15.



Figura A2.13 Fenómeno de separación de la columna líquida causado por un golpe de ariete. Cortesía de Eduardo Rodal



Figura A2.14 Colapso de una tubería causado por la depresión originada por un golpe de ariete. Cortesía de Eduardo Rodal



Figura A2.15 Falla en una tubería causada por un golpe de ariete. Cortesía de Eduardo Rodal

A3 Tuberías

En el sistema TransDocencia se consideran las tuberías elásticas y el fluido compresible, la operación transitoria se calcula con el modelo de golpe de ariete. A través de las ecuaciones características A2.17 y A2.18, que por conveniencia se escribirán con la notación de las ecuaciones A3.1 y A3.2, se obtienen para el instante $t + \Delta t$, la carga y el gasto en cada punto o sección interior de las tuberías, ver Figura A2.12.

$$Q_{j_{t+\Delta t}} = c_p - c_{a_i} H_{j_{t+\Delta t}} \quad (\text{A3.1})$$

$$Q_{j_{t+\Delta t}} = c_n + c_{a_i} H_{j_{t+\Delta t}} \quad (\text{A3.2})$$

Al resolver el sistema de ecuaciones lineales, se obtienen las ecuaciones A3.3 y A3.4 para el gasto y la carga en el punto j señalado en la Figura A3.1. Los parámetros c_p y c_n se determinan con las ecuaciones A2.15 y A2.16, respectivamente.

$$Q_{j_{t+\Delta t}} = 0.5(c_p + c_n) \quad (\text{A3.3})$$

$$H_{j_{t+\Delta t}} = \frac{c_p - Q_{j_{t+\Delta t}}}{c_{a_i}} \quad (\text{A3.4})$$

donde

$H_{j_{t+\Delta t}}$ es la carga en el punto j en el tiempo $t + \Delta t$, en m

$Q_{j_{t+\Delta t}}$ es el gasto en el punto j en el tiempo $t + \Delta t$, en m^3/s

c_p es el parámetro de la característica positiva, en m^3/s

c_n es el parámetro de la característica negativa, en m^3/s

c_{a_i} es la constante del método de las características del tubo i , en m^2/s

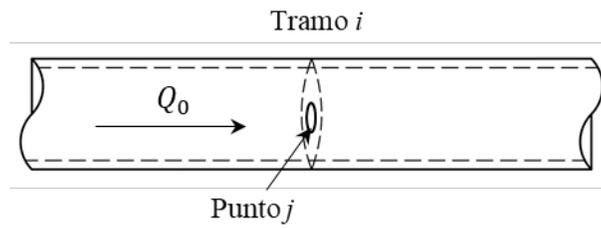


Figura A3.1 Punto o sección de cálculo del tramo i de la conducción. El punto j es un punto interior, ver Figura A2.12

A4 Cambio de tubería o tramo

Al considerar despreciables las pérdidas por velocidad en una región muy cercana a la unión de dos tubos y la pérdida de carga en la junta, las cargas y los gastos en el punto 1 y el punto 2 de la conducción de la Figura A4.1 son iguales. Éstos se obtienen a partir de las ecuaciones características A4.1 y A4.2, en donde los subíndices i y $i + 1$ se refieren a los tramos aguas arriba y aguas abajo de la unión, los subíndices 1 y 2 son los puntos de cálculo ubicados aguas arriba y aguas abajo inmediatos a la unión.

La constante c_{a_i} de la Ecuación A4.1 debe calcularse con las propiedades del tramo i y la de la Ecuación A4.2 con las propiedades del tramo $i + 1$, las que a su vez se determinan con la Ecuación A2.8.

Al restar la primera ecuación de la segunda y despejar la carga, se obtiene la carga en la unión de los tramos a través de la Ecuación A4.3, los gastos se obtienen sustituyendo la carga en cualquiera de las ecuaciones A4.1 o A4.2, los valores obtenidos de las variables corresponden al tiempo $t + \Delta t$, ver Figura A2.12.

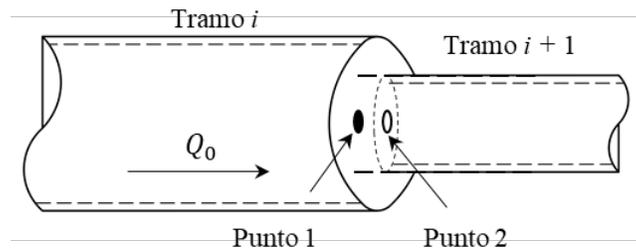


Figura A4.1 Cambio de tramo o de tubería

$$Q_{1t+\Delta t} = c_p - c_{a_i} H_{1t+\Delta t} \quad (\text{A4.1})$$

$$Q_{2t+\Delta t} = c_n + c_{a_{i+1}} H_{2t+\Delta t} \quad (\text{A4.2})$$

$$H_{1t+\Delta t} = \frac{c_p - c_n}{c_{a_i} + c_{a_{i+1}}} \quad (\text{A4.3})$$

A5 Modelo matemático de torres de oscilación y propuesta para obtener dimensiones preliminares

A5.1 Modelo matemático de torres de oscilación

Un pozo de oscilación divide a la conducción en dos tramos, uno aguas arriba del pozo (tramo i) y el otro, aguas abajo (tramo $i + 1$) como se muestra en la Figura A5.1. La carga piezométrica en la sección de la conducción en donde se interconecta el pozo queda definida por la elevación del espejo de agua, que durante un transitorio varía a lo largo del tiempo.

El modelo matemático de las torres (también llamadas tanques o pozos) de oscilación está formado por la ecuación de continuidad, Ecuación A5.1, en la intersección de la línea principal con la tubería de conexión (ver Figura A5.1); la ecuación dinámica de la torre, que escrita en diferencias es la Ecuación A5.2; la ecuación dinámica de la tubería de conexión, Ecuación A5.3; la relación de cargas en las secciones de la tubería principal aguas arriba y aguas abajo de la intersección de la tubería de conexión con la línea principal, considerando que no hay pérdidas se tiene la Ecuación A5.4; por último, las ecuaciones características del golpe de ariete (ecuaciones A4.1 y A4.2) aplicadas al punto 1 y punto 2 de la Figura A5.1.

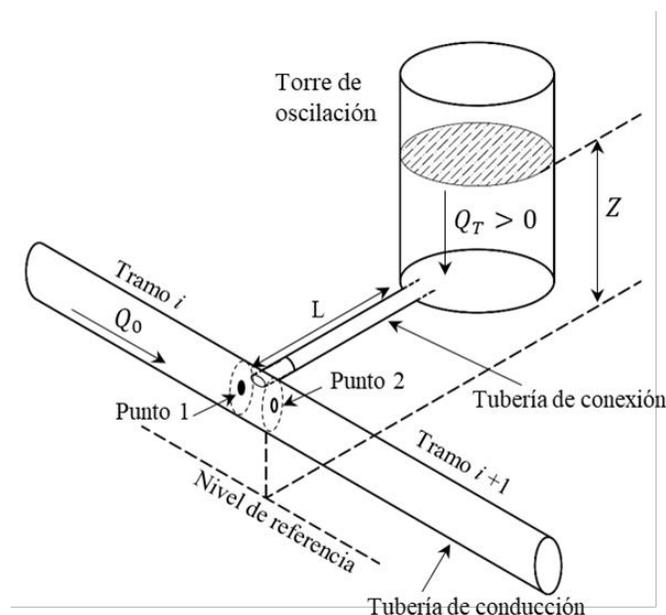


Figura A5.1 Conexión de torres de oscilación con la conducción

$$Q_{2t+\Delta t} = Q_{1t+\Delta t} + Q_{Tt+\Delta t} \quad (\text{A5.1})$$

$$\frac{Z_{t+\Delta t} - Z_t}{\Delta t} = -\frac{1}{A_T} \frac{Q_{Tt+\Delta t} + Q_{Tt}}{2} \quad (\text{A5.2})$$

$$Z_{t+\Delta t} - H_{1t+\Delta t} = \frac{L}{gA} \frac{Q_{Tt+\Delta t} - Q_{Tt}}{\Delta t} + \left(\frac{fL}{2gDA^2} \right) Q_{Tt+\Delta t} |Q_{Tt+\Delta t}| \quad (\text{A5.3})$$

$$H_{1t+\Delta t} = H_{2t+\Delta t} \quad (\text{A5.4})$$

donde

Q_T es el gasto que entrega (positivo) o recibe la torre (negativo), en m³/s

A_T es el área transversal de la torre, en m²

Z es la carga en la torre, en m

A es el área transversal de la tubería que conecta a la torre con la conducción, en m²

D es el diámetro de la tubería que conecta a la torre con la conducción, en m

L es la longitud de la tubería que conecta a la torre con la conducción, en m

Los subíndices t y Δt de las variables denotan el valor de la variable correspondiente a esos instantes de tiempo, los subíndices 1 y 2 se refieren al tramo i y tramo $i + 1$, respectivamente, de la Figura A5.1.

Se tiene un sistema compatible de seis ecuaciones (ecuaciones A5.1, A5.2, A5.3, A5.4, A4.1 y A4.2), con las seis incógnitas $Q_{Tt+\Delta t}$, $Q_{1t+\Delta t}$, $Q_{2t+\Delta t}$, $H_{1t+\Delta t}$, $H_{2t+\Delta t}$ y $Z_{t+\Delta t}$. Por el método de sustitución éste se reduce a la Ecuación A5.5 de segundo grado.

$$U Q_{Tt+\Delta t} |Q_{Tt+\Delta t}| + V Q_{Tt+\Delta t} + W = 0 \quad (\text{A5.5})$$

donde

$$U = \frac{fL}{2gDA^2} \quad (\text{A5.6})$$

$$V = \frac{L}{gA\Delta t} + \frac{1}{c_{a1} + c_{a2}} + \frac{\Delta t}{A_T} \quad (\text{A5.7})$$

$$W = \frac{c_p - c_n}{c_{a_1} + c_{a_2}} - \frac{L}{gA\Delta t} Q_{T_t} - Z_t \quad (\text{A5.8})$$

Cuando $Q_{T_{t+\Delta t}} > 0$ la torre entrega agua a la línea, cuando $Q_{T_{t+\Delta t}} < 0$ la torre recibe agua. Una vez que se ha obtenido $Q_{T_{t+\Delta t}}$ la carga en la torre ($Z_{t+\Delta t}$) se obtiene con la Ecuación A5.2, la carga en el Punto 1 y Punto 2 con las ecuaciones A5.3 y A5.4 y sus gastos con las ecuaciones características A4.1 y A4.2.

A5.2 Propuesta para obtener dimensiones preliminares

El procedimiento que se presenta a continuación, para determinar un valor preliminar de la sección transversal de las torres de oscilación, toma como hipótesis que la presencia del tanque de oscilación, reduce significativamente la rapidez de variación de las condiciones de frontera producidas por corte de bombeo, de tal manera que el comportamiento transitorio puede representarse con el modelo de oscilación de masa o de transitorio lento.

El valor preliminar del área transversal de torres de oscilación se obtiene a partir de la condición de operación en flujo permanente. En Carmona et al. (2002), se obtienen las ecuaciones A5.9, A5.10 y A5.11, el significado de las variables que intervienen se muestran en la Figura A5.2.

$$A_T = \frac{LQ_0^2}{gA(H_{1_0} - H_{res})^2} a_{min} \quad (\text{A5.9})$$

$$a_{min} = 0.541\ 759\ 62(0.875\ 282)^{z_{min}}(z_{min})^{-0.982\ 583\ 7} \quad (\text{A5.10})$$

$$z_{min} = \left| \frac{H_{1_{min}} - H_{res}}{H_{1_0} - H_{res}} \right| \quad (\text{A5.11})$$

donde

A_T es el área de la sección transversal de la torre de oscilación, en m^2

L es la longitud de la conducción desde la torre de oscilación hasta la descarga, en m

- Q_0 es el gasto en la conducción en flujo establecido, en m^3/s
- g es la aceleración de la fuerza de gravedad, en m/s^2
- A es el área de la sección transversal de la conducción, en m^2
- H_{1_0} es la carga piezométrica en flujo establecido en la conducción en el sitio de la conexión con el tanque de oscilación, en m
- H_{res} es la carga en el tanque de descarga, en m
- $H_{1_{min}}$ es la carga piezométrica mínima en la conducción en el sitio de la conexión con el tanque de oscilación, dato propuesto por el diseñador, en m

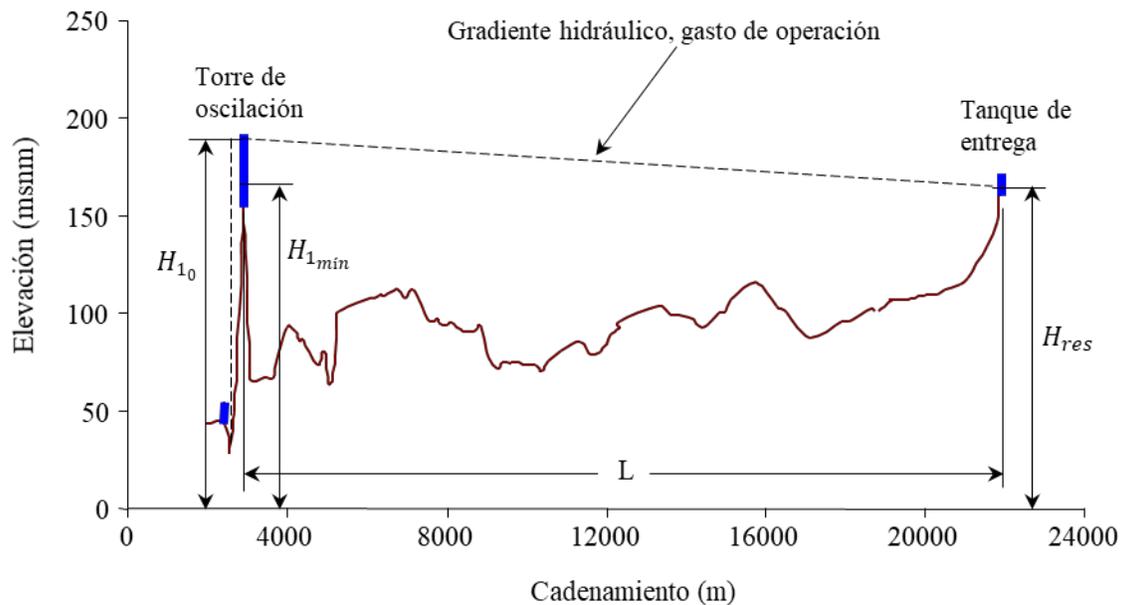


Figura A5.2 Variables para estimar el valor preliminar del área transversal de torres de oscilación

A6 Modelo matemático de tanques unidireccionales y propuesta para obtener dimensiones preliminares

A6.1 Modelo matemático

El modelo matemático del tanque unidireccional es similar al de la torre de oscilación excepto que la Ecuación A5.3 debe sustituirse por la Ecuación A6.1, debido a que en la tubería de conexión del tanque unidireccional con la línea de conducción están instaladas las válvulas de no retorno también llamadas check o de retención y las válvulas de llenado o válvulas de altitud, ver Figura A6.1.

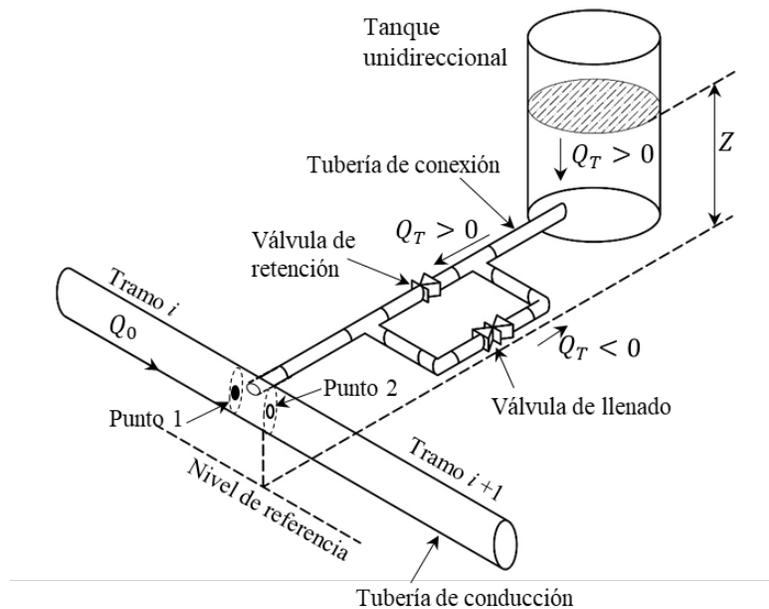


Figura A6.1 Conexión de tanques unidireccionales con la conducción

$$Z_{t+\Delta t} - H_{1t+\Delta t} = \frac{L}{gA} \frac{Q_{Tt+\Delta t} - Q_{Tt}}{\Delta t} + \left(\frac{fL}{2gDA^2} + K_V \right) Q_{Tt+\Delta t} |Q_{Tt+\Delta t}| \quad (\text{A6.1})$$

donde

K_v es el coeficiente de pérdida de carga de las válvulas en s^2/m^5 . Cuando el agua sale del tanque corresponde al de las válvulas de no retorno, cuando el agua entra al tanque corresponde al de las válvulas de llenado.

Se tiene un sistema compatible de seis ecuaciones (ecuaciones A5.1, A5.2, A6.1, A5.4, A4.1 y A4.2), con las seis incógnitas $Q_{T_{t+\Delta t}}$, $Q_{1_{t+\Delta t}}$, $Q_{2_{t+\Delta t}}$, $H_{1_{t+\Delta t}}$, $H_{2_{t+\Delta t}}$ y $Z_{t+\Delta t}$. Por el método de sustitución el sistema se reduce a la Ecuación A6.2, ecuación de segundo grado donde U , V y W están definidas en las ecuaciones A5.6, A5.7 y A5.8.

$$(U + K_V) Q_{T_{t+\Delta t}} |Q_{T_{t+\Delta t}}| + V Q_{T_{t+\Delta t}} + W = 0 \quad (\text{A6.2})$$

Cuando $Q_{T_{t+\Delta t}} > 0$ el tanque entrega agua a la línea y K_V corresponde al coeficiente de pérdida de las válvulas de retención, cuando $Q_{T_{t+\Delta t}} < 0$ el agua entra al tanque, K_V es el coeficiente de pérdida de las válvulas de llenado.

A6.2 Propuesta para obtener dimensiones preliminares de tanques unidireccionales

Las dimensiones de los tanques y sus volúmenes de agua deben ser tales que durante su funcionamiento no se vacíen para evitar la entrada de aire a la tubería, además, deberán estar preparados para volver a operar inmediatamente, previendo que el sistema se vuelva a poner en operación antes de que los tanques unidireccionales recuperen sus volúmenes de agua a través de las respectivas válvulas de llenado.

El área transversal preliminar puede obtenerse con la ecuación A6.3.

$$A_T = \frac{4L Q_0}{a D} \quad (\text{A6.3})$$

donde

A_T es el área transversal preliminar del tanque unidireccional, en m^2

Q_0 es el gasto en la conducción en flujo establecido, en m^3/s

- D es el diámetro de la conducción, en m
- L es la longitud de la conducción, aguas abajo del tanque que protegerá el mismo tanque unidireccional, puede ser una sección de la conducción, en m
- a celeridad, en m/s

En simulaciones posteriores, para determinar las dimensiones definitivas del tanque, los coeficientes de pérdida de carga deberán corresponder al diseño del arreglo funcional de las válvulas. En la Figura A6.2 se presenta el arreglo funcional de las válvulas de los tanques unidireccionales del acueducto Linares-Monterrey, México (Guarga *et al.*, 1984).

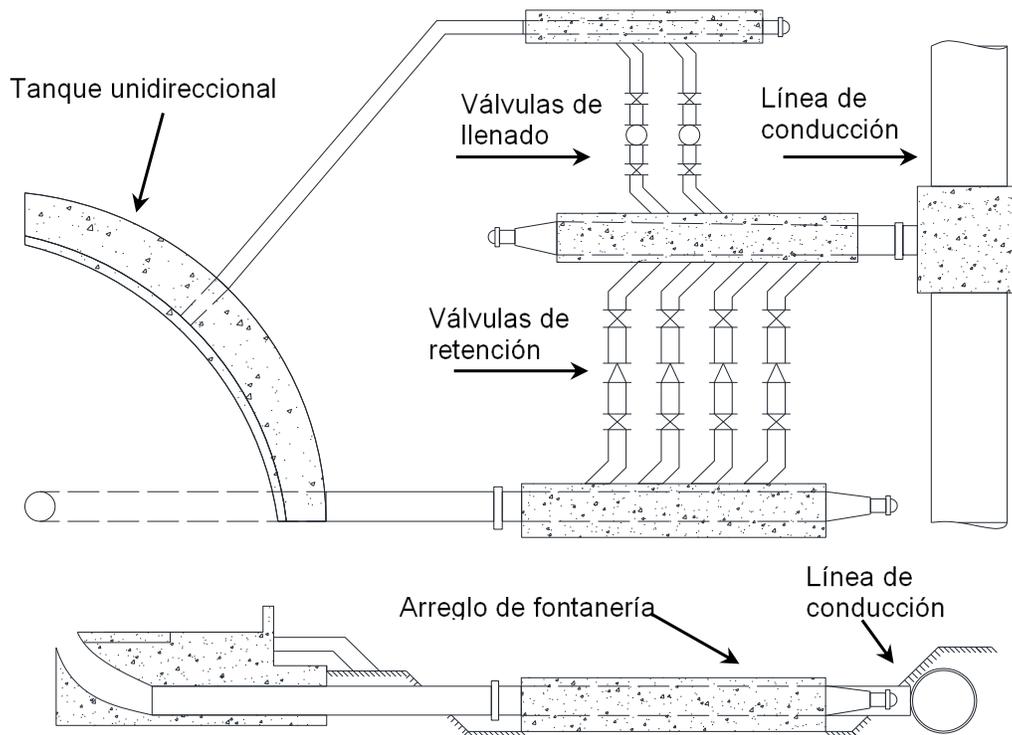


Figura A6.2 Arreglo funcional de las válvulas de los tanques unidireccionales del acueducto Linares-Monterrey, México (Guarga *et al.*, 1984)

A7 Modelo matemático de cámaras de aire y propuesta para obtener dimensiones preliminares

A7.1 Modelo matemático

El modelo matemático está formado por las ecuaciones de continuidad en la intersección de la cámara con la tubería, la dinámica del volumen de agua en la cámara, del volumen de aire, de la tubería que conecta a la cámara con la línea principal y las ecuaciones características en la tubería.

En la unión de la cámara con la tubería se debe satisfacer la ecuación de continuidad A7.1, el sentido de los flujos se indica en la Figura A7.1, considerando que la pérdida de carga es muy pequeña en la interconexión de la cámara con la conducción, se tiene la Ecuación A7.2.

$$Q_1 + Q_c = Q_2 \quad (\text{A7.1})$$

$$H_1 = H_2 \quad (\text{A7.2})$$

donde

Q_c es el gasto que entrega o recibe la cámara, en m /s

Q_1 es el gasto en la conducción aguas arriba de la cámara, en m /s

Q_2 es el gasto en la conducción aguas abajo de la cámara, en m /s

H_1 es la carga en la conducción inmediatamente aguas arriba del sitio de conexión de la cámara, en m

H_2 es la carga en la conducción inmediatamente aguas abajo del sitio de conexión de la cámara, en m

Considerando que el flujo entre la cámara y la tubería es como el de una columna rígida su ecuación dinámica es la A7.3, ver Figura A7.2.

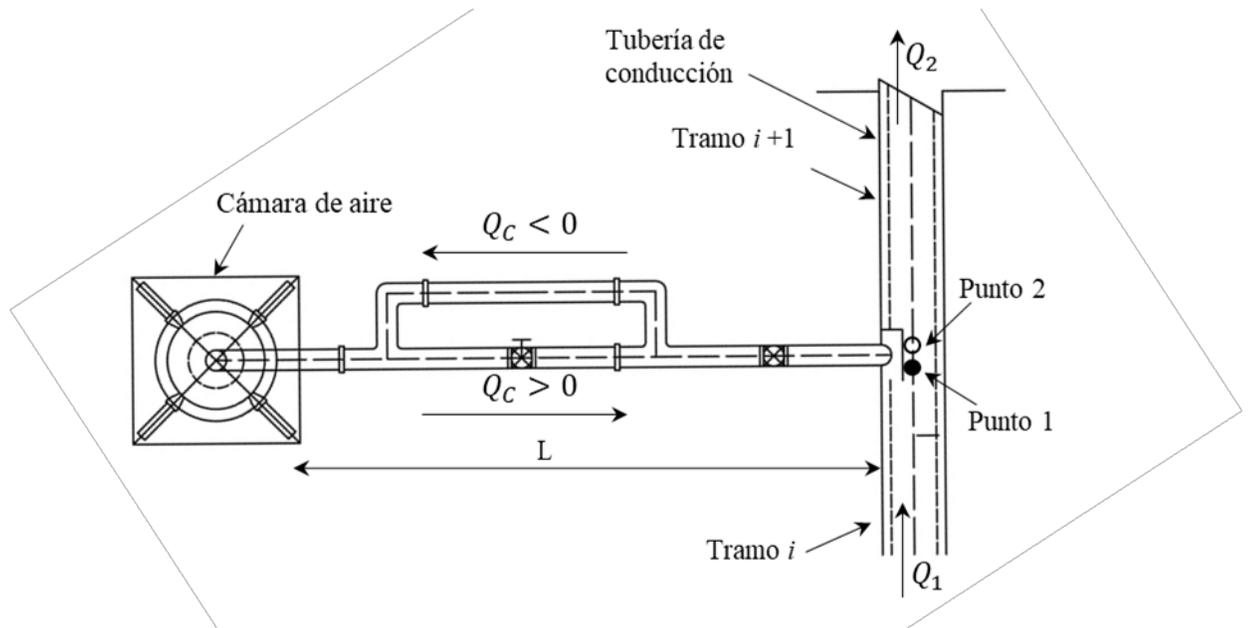


Figura A7.1 Conexión de la cámara de aire con la tubería principal

$$H_c - H_1 = \frac{L}{gA} \frac{dQ_c}{dt} + f \frac{L}{2gD} \frac{Q_c |Q_c|}{A^2} + K_V Q_c |Q_c| \quad (\text{A7.3})$$

donde

H_c es la carga en la cámara de aire, en m

K_V es el coeficiente de pérdida de entrada o salida del agua de la cámara, en s/m^5

A es el área transversal de la tubería que conecta a la cámara con la conducción, en m^2

D es el diámetro de la tubería que conecta a la cámara con la conducción, en m

L es la longitud de la tubería que conecta a la cámara con la conducción, en m

f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach de la tubería que conecta a la cámara con la conducción

g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2

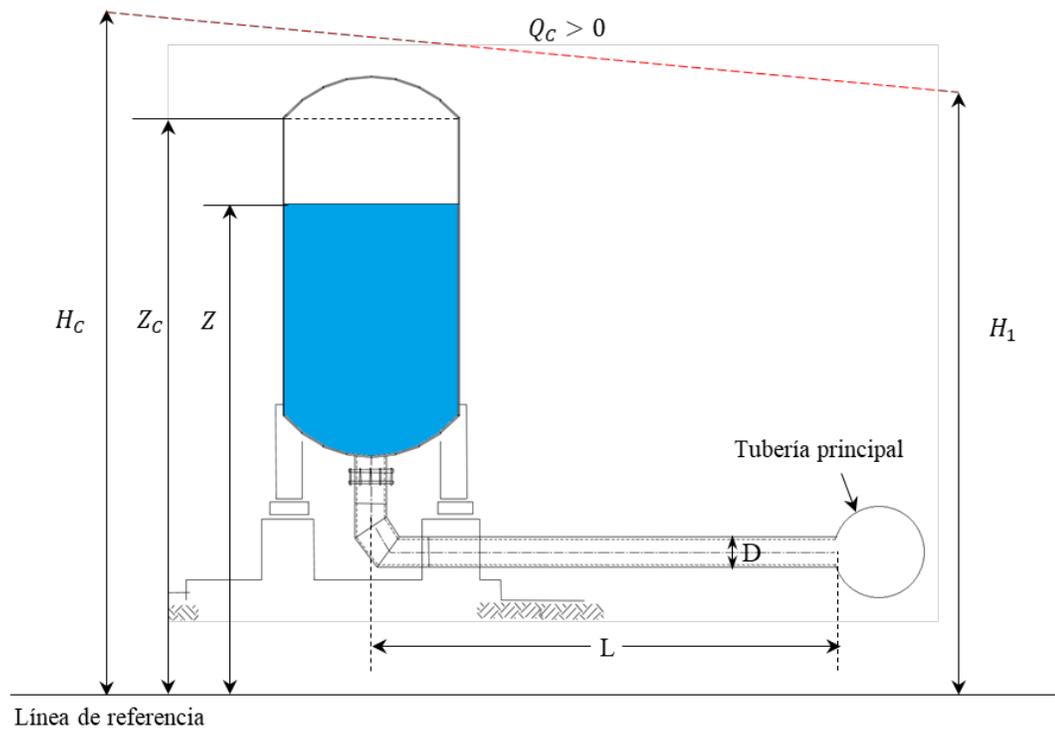


Figura A7.2 En la tubería de conexión de la cámara de aire con la conducción se considera el modelo de columna rígida

La variación del nivel del agua en la cámara, Z , depende del área transversal de la cámara, A_c , y del gasto de agua que entra o sale de la cámara, como indica la Ecuación A7.4.

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{Q_c}{A_c} \quad (\text{A7.4})$$

La presión absoluta del aire está dada por la Ecuación A7.5.

$$p = p_a + \gamma(H_c - Z) \quad (\text{A7.5})$$

donde

p es la presión absoluta del aire en la cámara, en Pa

p_a es la presión atmosférica, en Pa

γ es el peso específico del agua, en N/m

Z es la cota de elevación del espejo de agua en la cámara, en msnm

Se ha visto que el proceso de expansión y compresión del aire en el interior de la cámara, se representa con muy buena aproximación considerando al aire como un gas perfecto, por lo que, $pV^\alpha = C^*$ donde p es la presión absoluta del aire, V su volumen, C^* una constante y α puede considerarse constante con un valor entre 1.0 y 1.4.

Considerando el área transversal de la cámara constante y el volumen de aire contenido en la tapa de la cámara es muy pequeño comparado con el contenido en su sección recta, el volumen de aire puede aproximarse con $V = A_C(Z_C - Z)$ (ver Figura A7.2) y definiendo $C = A_C^{-\alpha} C^*$, se obtiene la Ecuación A7.6. En el sistema TransDocencia v2.3 se considera $\alpha = 1.2$ debido a los buenos resultados que se han obtenido en comparaciones de simulaciones numéricas con medidas en campo.

$$p(Z_C - Z)^\alpha = C \quad (\text{A7.6})$$

donde

Z_C es la elevación del límite superior de la sección recta de la cámara de aire, en msnm

C es una constante, en kg/s^2

Las incógnitas del sistema formado por las ecuaciones A7.1 a A7.6 son Q_C , Q_1 , Q_2 , H_1 , H_2 , H_C , p y Z , se tienen seis ecuaciones con ocho incógnitas. El sistema se completa con el modelo de golpe de ariete en la conexión de la cámara con la tubería a través de las ecuaciones características A4.1 y A4.2.

El sistema se resuelve numéricamente, para ello, las ecuaciones A7.1 a A7.6 se escribe en diferencias finitas. El sistema completo está formado por las ecuaciones A4.1, A4.2, A7.7 a A7.12. Ahora la nueva nomenclatura de las incógnitas es $Q_{C_{t+\Delta t}}$, $Q_{1_{t+\Delta t}}$, $Q_{2_{t+\Delta t}}$, $H_{1_{t+\Delta t}}$, $H_{2_{t+\Delta t}}$, $H_{C_{t+\Delta t}}$, $p_{t+\Delta t}$ y $Z_{t+\Delta t}$. Los subíndices t y $t + \Delta t$ indican el valor de la variable correspondiente en el tiempo t y en el tiempo $t + \Delta t$, respectivamente.

$$Q_{2_{t+\Delta t}} = Q_{1_{t+\Delta t}} + Q_{C_{t+\Delta t}} \quad (\text{A7.7})$$

$$H_{1_{t+\Delta t}} = H_{2_{t+\Delta t}} \quad (\text{A7.8})$$

$$H_{C_{t+\Delta t}} - H_{1_{t+\Delta t}} = \frac{L}{gA} \frac{Q_{C_{t+\Delta t}} - Q_{C_t}}{\Delta t} + \left(\frac{fL}{2gDA^2} + K_V \right) Q_{C_{t+\Delta t}} |Q_{C_{t+\Delta t}}| \quad (\text{A7.9})$$

$$\frac{Z_{t+\Delta t} - Z_t}{\Delta t} = - \frac{1}{A_C} \frac{Q_{C_{t+\Delta t}} + Q_{C_t}}{2} \quad (\text{A7.10})$$

$$p_{t+\Delta t} = p_a + \gamma(H_{C_{t+\Delta t}} - Z_{t+\Delta t}) \quad (\text{A7.11})$$

$$p_{t+\Delta t} (Z_C - Z_{t+\Delta t})^{1.2} = C \quad (\text{A7.12})$$

A través del método de sustitución, el sistema anterior puede reducirse a una ecuación no lineal en $Q_{C_{t+\Delta t}}$, la cual puede resolverse con el método de Newton-Raphson.

Cuando $Q_{C_{t+\Delta t}} > 0$ significa que la cámara se está vaciando y debe considerarse el coeficiente de pérdida del orificio de salida de agua. Si $Q_{C_{t+\Delta t}} < 0$, significa que está entrando agua a la cámara y debe tomarse en cuenta el coeficiente de pérdida K_V de entrada a la cámara.

Una vez obtenido el gasto $Q_{C_{t+\Delta t}}$, la elevación del agua en la cámara $Z_{t+\Delta t}$ se obtiene con la Ecuación A7.10, la presión en el interior de la cámara $p_{t+\Delta t}$ con la Ecuación A7.12 (la constante C se determina a partir de las condiciones de operación en flujo estable), la carga piezométrica en la cámara $H_{C_{t+\Delta t}}$ con la Ecuación A7.11, las cargas en los puntos 1 y 2 (ver Figura A7.1) con las ecuaciones A7.9 y A7.8, los gastos en esas secciones de la conducción con las ecuaciones características A4.1 y A4.2.

A7.2 Propuesta para obtener dimensiones preliminares de cámaras de aire

El volumen de aire en el interior de la cámara, la cota de elevación del espejo de agua, el área transversal de la cámara y los coeficientes de pérdida de carga del flujo que entra o sale de la cámara son los parámetros que caracterizan una cámara de aire, para

predeterminarlos se han propuestos varios métodos, como los presentados en Guarga et al. (1985), Thorley (1991) y Carmona et al. (2002).

A continuación, se presenta el algoritmo propuesto en Carmona et al. (2002), con el cual se obtiene un valor preliminar del volumen de aire. El método se basa en la hipótesis de que la presencia de cámaras de aire reduce significativamente la rapidez de variación de las presiones producidas por corte de bombeo, de tal manera que una vez que comienza a operar la cámara de aire, el comportamiento transitorio puede representarse con el modelo de oscilación de masa o de transitorio lento, el cual se presenta entre la cámara de aire y el tanque de entrega.

El valor preliminar del volumen de aire se obtiene aplicando la Ecuación A7.13 a la Ecuación A7.20, en la Figura A7.3 se indican las dimensiones de las variables involucradas.

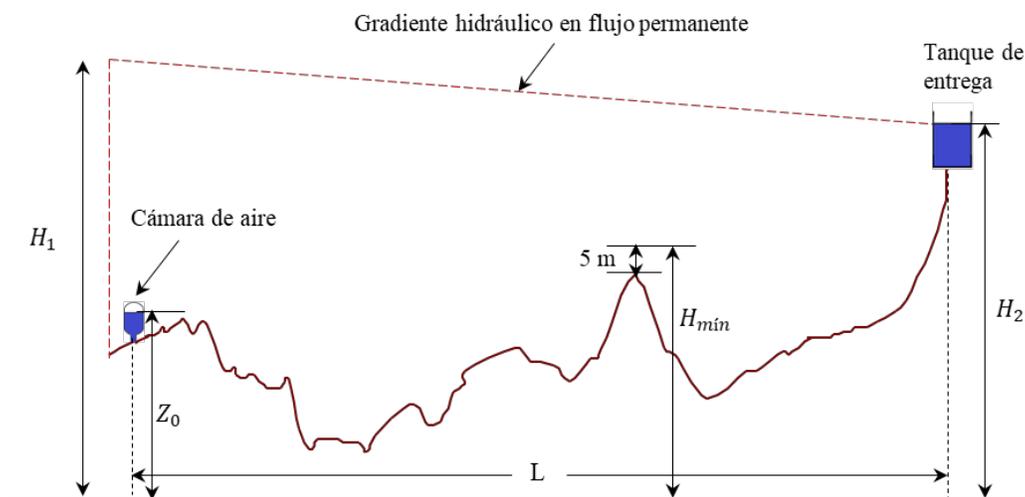


Figura A7.3 Parámetros para calcular un valor preliminar del volumen de aire en la cámara

$$p_1 = (H_1 - Z_0 + 10.33)(9\ 810) \quad (\text{A7.13})$$

$$p_2 = (H_2 - Z_0 + 10.33)(9\ 810) \quad (\text{A7.14})$$

$$z_{mín} = \frac{H_{mín} - H_2}{H_1 - H_2} \quad (A7.15)$$

$$E_K = \frac{9\,810\,L}{2gA} Q_0^2 \quad (A7.16)$$

donde

H_1 es la carga piezométrica en la descarga de las bombas en flujo estable, en m

H_2 es la carga piezométrica en la descarga del tramo de conducción, en m

$H_{mín}$ es la carga piezométrica mínima permitida en algún punto alto del tramo de la conducción que protegerá la cámara de aire, en m

Z_0 es la cota de elevación del espejo de agua en la cámara de aire (elevación de la interface agua-aire), en msnm

L es la longitud del tramo de conducción que protegerá la cámara, en m

A es el área transversal de la conducción, en m

Q_0 es el gasto en flujo estable, en m³/s.

Con los valores obtenidos a través de las ecuaciones A7.13 a A7.16, se aplican las ecuaciones A7.17 a A7.19.

$$r = p_1/p_2 \quad (A7.17)$$

El valor de T^* , en la Ecuación A7.18, se determina numéricamente, una herramienta de apoyo puede ser Excel.

$$T^* e^{T^*} + \frac{\pi}{2 z_{mín}} = 0 \quad (A7.18)$$

Una vez determinados los parámetros r y T^* , se calcula el valor del parámetro K con la Ecuación A7.19.

$$K = \frac{1 + \left(\frac{\pi}{2T^*}\right)^2}{1 - z_{mín}} \left\{ \frac{1}{\left(z_{mín} + \frac{1 - z_{mín}}{r}\right)^{1/1.2}} - 1 \right\} \quad (A7.19)$$

Finalmente, el valor preliminar del volumen de aire se obtiene con la Ecuación A7.20.

$$V_0 = \frac{2 E_K}{p_1 K \left(1 - \frac{1}{r}\right)} \quad (\text{A7.20})$$

donde

V_0 valor preliminar del volumen de aire, en m^3

Se debe poner atención en la variación del nivel del agua en la cámara, pues es recomendable que ésta no se vacíe para evitar que entre aire a la tubería. La variación del nivel del agua en la cámara depende de su área, para determinarla se han propuesto varios criterios, uno de ellos se presenta en Guarga et al. (1985), en donde se propone que la altura de la columna de aire antes de que la cámara comience a operar sea igual al diámetro de la cámara, sin considerar el volumen de la tapa de la cámara, para esa geometría se obtiene la Ecuación A7.21.

$$D_C = \left(\frac{4V_0}{\pi}\right)^{1/3} \approx (1.3 V_0)^{1/3} \quad (\text{A7.21})$$

Usando otro criterio, por ejemplo, que la altura de la columna de aire, sea igual a 3/4 del diámetro de la cámara, se obtiene la Ecuación A7.22.

$$D_C = \left(\frac{16 V_0}{3 \pi}\right)^{1/3} \approx (1.7 V_0)^{1/3} \quad (\text{A7.22})$$

donde

D_C es el diámetro preliminar de la cámara, en m

V_0 es el volumen preliminar de aire, en m^3

En la Figura A7.4 se muestra la sección cilíndrica de dos cámaras de aire, el diámetro de una de ellas se determinó con la Ecuación A7.21 y el diámetro de la otra con la Ecuación A7.22, ambas contienen el mismo volumen de aire.

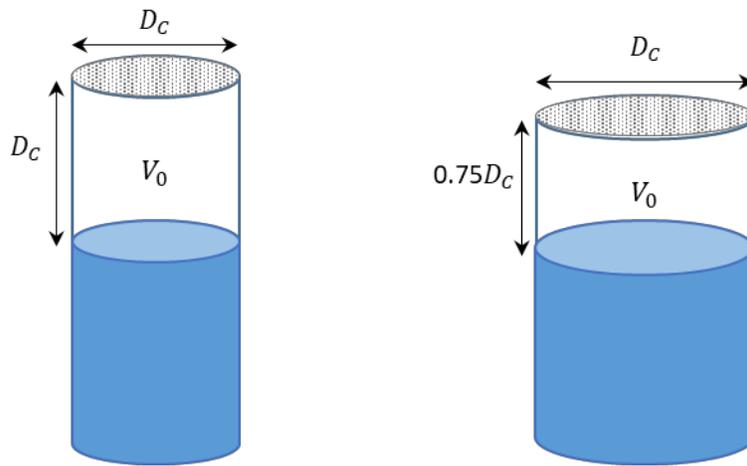


Figura A7.4 En su sección cilíndrica, ambas cámaras contienen el mismo volumen de aire, el diámetro de la cámara de la izquierda se determinó con la Ecuación A7.21 y el de la derecha con la Ecuación A7.22

A8 Modelo matemático de válvulas de admisión y expulsión de aire

En el modelo matemático de la operación de las válvulas de admisión y expulsión de aire deben considerarse las etapas de admisión y compresión del aire.

Modelo de admisión de aire. Cuando las cargas de presión en las secciones de la tubería indicadas con los puntos 1 y 2 de la Figura A8.1 se igualan al valor de la carga que comanda la apertura de la válvula y se considera despreciable la pérdida de carga entre esas dos secciones de la tubería, se cumplen las ecuaciones A8.1 y A8.2. El volumen de aire que entra a la tubería interfiere con el flujo de agua en los puntos 1 y 2, de tal manera que el gasto de aire que ingresa está relacionado con los gastos de agua en los puntos 1 y 2 a través de la Ecuación A8.3.

$$H_1 = Z \quad (\text{A8.1})$$

$$H_2 = Z \quad (\text{A8.2})$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_2 - Q_1 \quad (\text{A8.3})$$

donde

Q_1 es el gasto en la conducción aguas arriba de la válvula, en m /s

Q_2 es el gasto en la conducción aguas abajo de la válvula, en m /s

H_1 es la carga en la conducción inmediatamente aguas arriba del sitio de conexión de la válvula, en m

H_2 es la carga en la conducción inmediatamente aguas abajo del sitio de conexión de la válvula, en m

Z es la carga piezométrica que comanda la apertura de la válvula, en msmn

V es el volumen de aire que entra a la tubería, en m³

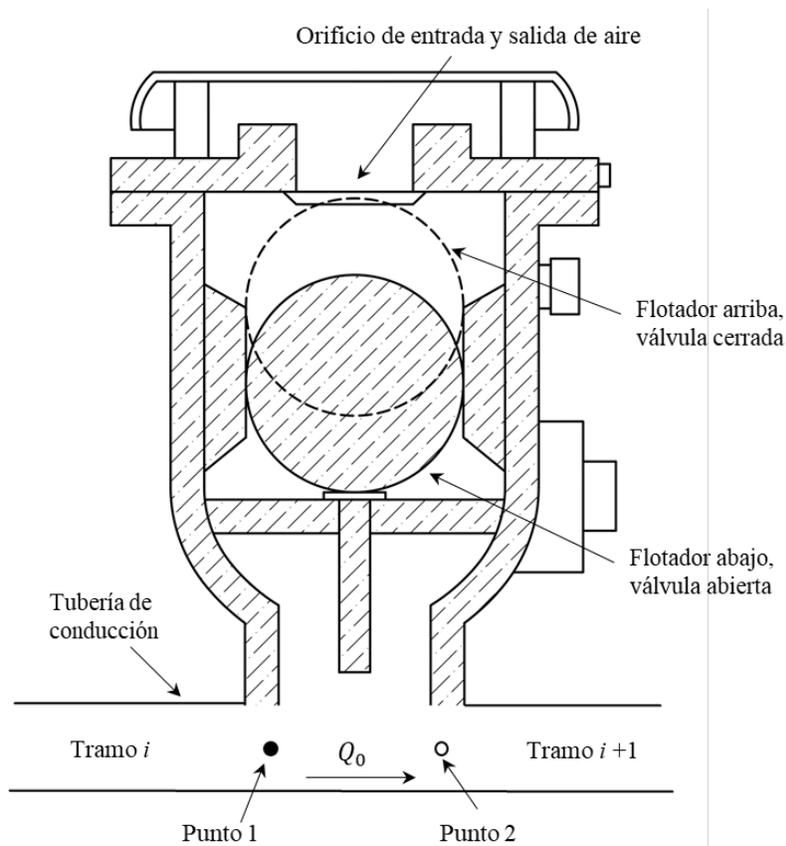


Figura A8.1 Válvula de admisión y expulsión de aire

El sistema formado por las tres ecuaciones A8.1 a A8.2 tiene cinco incógnitas (Q_1 , Q_2 , H_1 , H_2 y V), éste se completa con las dos ecuaciones características. La solución se obtiene numéricamente, al escribir las ecuaciones en diferencias finitas toma la forma de las ecuaciones A4.1, A4.2, A8.4 a A8.6, cuyas incógnitas son $Q_{1t+\Delta t}$, $Q_{2t+\Delta t}$, $H_{1t+\Delta t}$, $H_{2t+\Delta t}$ y $V_{t+\Delta t}$, los subíndices t y $t + \Delta t$ indican el valor de la variable correspondiente en el tiempo t y en el tiempo $t + \Delta t$, respectivamente. A través del método de sustitución el sistema se reduce a la ecuación lineal A8.7.

$$H_{1t+\Delta t} = Z \quad (\text{A8.4})$$

$$H_{2t+\Delta t} = Z \quad (\text{A8.5})$$

$$\frac{V_{t+\Delta t} - V_t}{\Delta t} = \frac{Q_{2t+\Delta t} + Q_{2t}}{2} - \frac{Q_{1t+\Delta t} + Q_{1t}}{2} \quad (\text{A8.6})$$

$$V_{t+\Delta t} = V_t + \frac{\Delta t}{2} [Q_{2t} - Q_{1t} + (c_{a_1} + c_{a_2})Z + c_n - c_p] \quad (\text{A8.7})$$

Una vez que se determina el volumen $V_{t+\Delta t}$, se obtiene la diferencia de gastos en $t + \Delta t$ con la Ecuación A8.6, a través de las ecuaciones A4.1, A4.2, A8.4 y A8.5 se obtienen las cargas en los puntos 1 y 2, por último con las ecuaciones características se obtienen los gastos.

Modelo de compresión del aire. Existen varias condiciones para que el volumen de aire que ingresó a la tubería se comprima, entre ellas, cuando el sentido del flujo aguas abajo de la VAEA se invierte (ahora se dirige del tanque de entrega hacia el bombeo) y su magnitud es mayor que el flujo en la sección aguas arriba de la VAEA. El proceso de compresión del aire, escrito en diferencias finitas, se representa con el sistema de ecuaciones A4.1, A4.2, A8.4, A8.5, A8.8 y A8.9. Las incógnitas son $Q_{1t+\Delta t}$, $Q_{2t+\Delta t}$, $H_{1t+\Delta t}$, $H_{2t+\Delta t}$, $V_{t+\Delta t}$ y $p_{t+\Delta t}$.

$$H_{1t+\Delta t} = \frac{1}{\gamma} (p_t - p_a) + Z \quad (\text{A8.8})$$

$$p_{t+\Delta t} V_{t+\Delta t}^\alpha = C \quad (\text{A8.9})$$

donde

p_t es la presión absoluta en el interior de la conducción en el tiempo t , en N/m^2

$p_{t+\Delta t}$ es la presión absoluta en el interior de la conducción en el tiempo $t + \Delta t$, en N/m^2

p_a es la presión atmosférica, en N/m^2

γ es el peso específico del agua, en N/m^3

α es el coeficiente politrópico del aire

A través de comparaciones de medidas en prototipo con resultados de simulaciones numéricas se ha visto que $\alpha = 1.2$ representa adecuadamente el proceso de compresión del aire que entró a la tubería, la constante C de la Ecuación A8.9 se determina con la condición de operación inmediata anterior al inicio de la compresión.

El sistema de ecuaciones anterior, se reduce a la Ecuación A8.10 cuya incógnita ($H_{1_{t+\Delta t}}$) es la carga en la sección de la tubería en donde se localiza la VAEA, ésta puede resolverse con el método iterativo de Newton-Raphson. Una vez calculada $H_{1_{t+\Delta t}}$ se obtiene $H_{2_{t+\Delta t}}$ con las ecuaciones A8.4 y A8.5. Con las ecuaciones características A4.1 y A4.2 se determinan $Q_{1_{t+\Delta t}}$ y $Q_{2_{t+\Delta t}}$, con la Ecuación A8.6 se calcula $V_{t+\Delta t}$ y finalmente con la Ecuación A8.9 se determina $p_{t+\Delta t}$.

$$(H_{1_{t+\Delta t}} + H_{1_t} - Z) \left[V_t + \frac{\Delta t}{2} (Q_{2_t} - Q_{1_t} + c_n - c_p + (c_{a_1} + c_{a_2})H_{1_t}) \right]^\alpha - C = 0 \quad (\text{A8.10})$$

A8.1 Determinación del diámetro de válvulas de admisión y expulsión de aire

La función de las válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA), también conocidas como válvulas rompedoras de vacío, es crear una conexión entre el interior de la conducción y la atmósfera para evitar depresiones. Cuando en la tubería se presenta una carga piezométrica menor que la de operación de la válvula (denotada como Cota de la entrada de aire [msnm] en la Figura A8.2), determinada por los operadores del sistema, la válvula se abre para que ingrese aire, en ese momento se establece la presión atmosférica en el interior de la tubería.

Debido a los cambios de presión durante el transitorio, cuando la carga aumenta y adquiere un valor mayor que la de operación de la válvula, ésta se cierra y se suspende el ingreso de aire, como se muestra en la Figura A8.3.

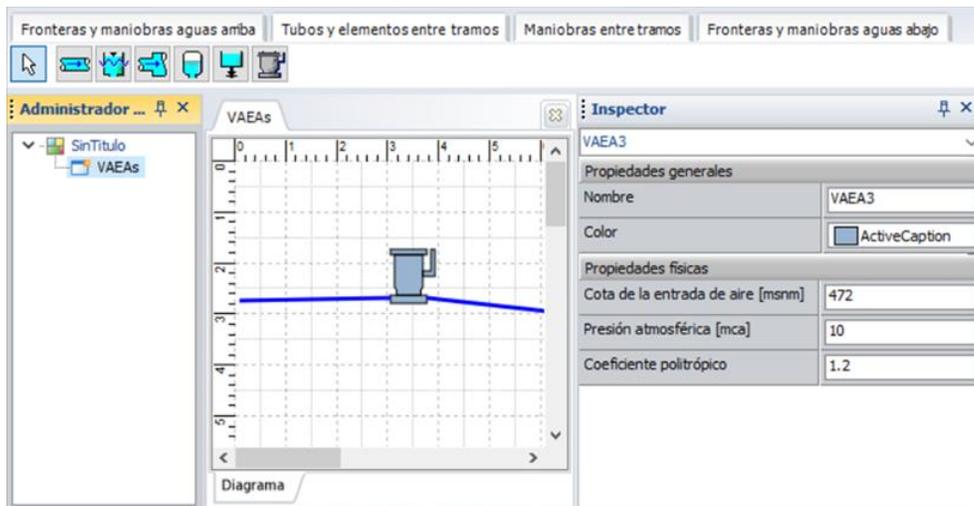


Figura A8.2 En este caso, cuando la carga piezométrica es 472 m en el sitio en donde se ubica la válvula, habrá ingreso de aire a la tubería

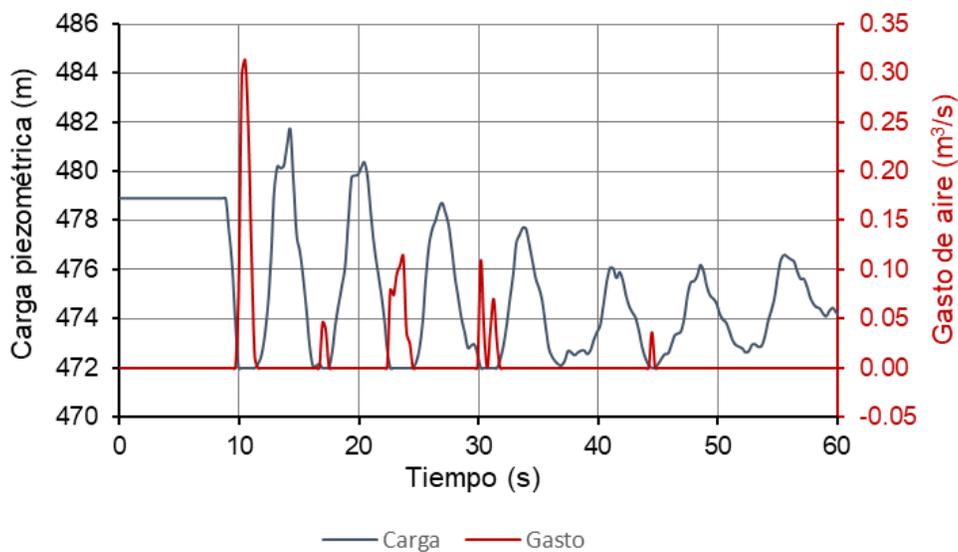


Figura A8.3 Cada vez que la carga piezométrica en el sitio en donde está conectada la válvula es 472 m, hay ingreso de aire a la tubería (gráfica creada en Excel usando la información de los archivos de resultados, de la carga y el gasto, botón abajo a la izquierda de la Figura A8.4)

La selección de la válvula se determina a través del caudal máximo de aire que ingresa a la tubería y de la diferencial presión que permite ese caudal (diferencia de presión atmósfera menos la presión de operación de la válvula). A continuación, se presenta cómo determinar el diámetro de la válvula.

1. Se debe conocer el caudal máximo de aire que ingresa. A través del panel "Gráficas de resultados y reporte de la simulación", botón *Gastos*, se selecciona la pestaña del gasto de la VAEA, en este ejemplo Q(VAEA3), se oprime el botón izquierdo del ratón sobre el punto máximo de la curva para que se muestren sus coordenadas en la izquierda superior de la gráfica, Figura A8.4. En este caso, el gasto máximo es $0.31 \text{ m}^3/\text{s} = 10.95 \text{ pies}^3/\text{s}$.

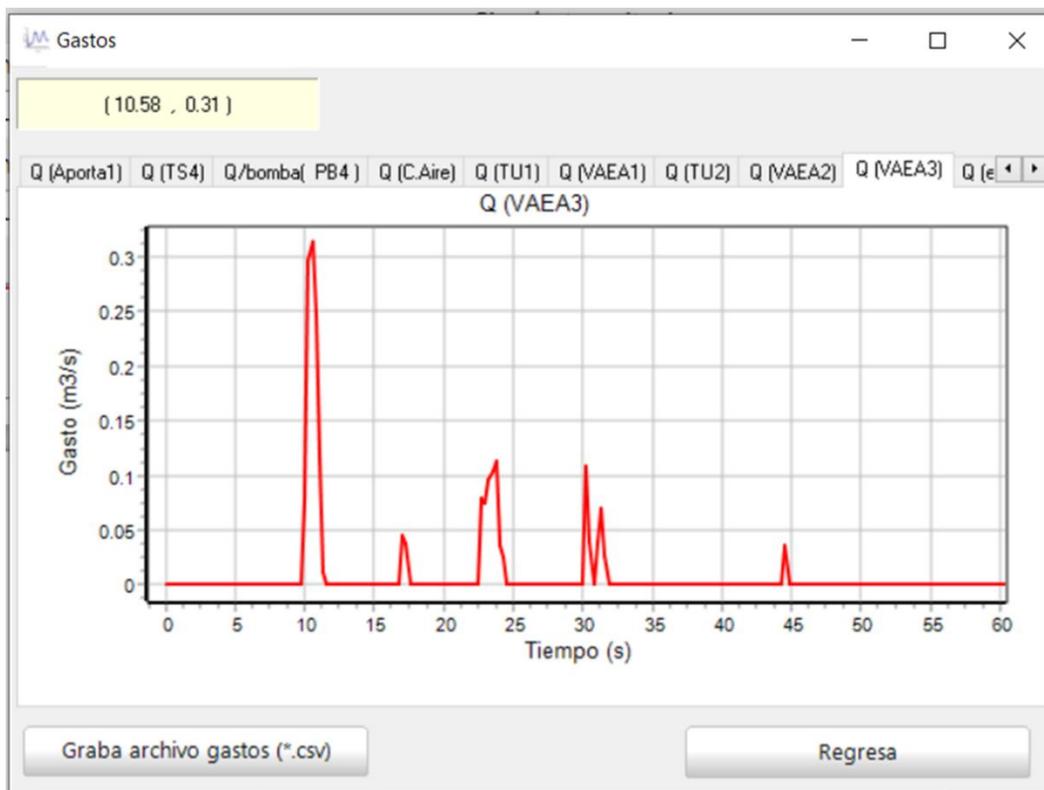


Figura A8.4 El caudal máximo de aire que ingresa es $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$

2. Suponiendo que la elevación del terreno en la que se localiza la válvula es 369 msnm, el ingreso del aire inicia cuando se presenta la diferencia de carga $\Delta h = (372 - 369) = 3 \text{ m} = 4.26 \text{ psi}$.
3. Sobre una gráfica proporcionada por fabricantes de válvulas, como la de la Figura A8.5, se localiza el punto (10.95, 4.26), el cual se localiza entre las curvas para las válvulas de diámetro 2" y 3", la válvula que se selecciona es la de 3".

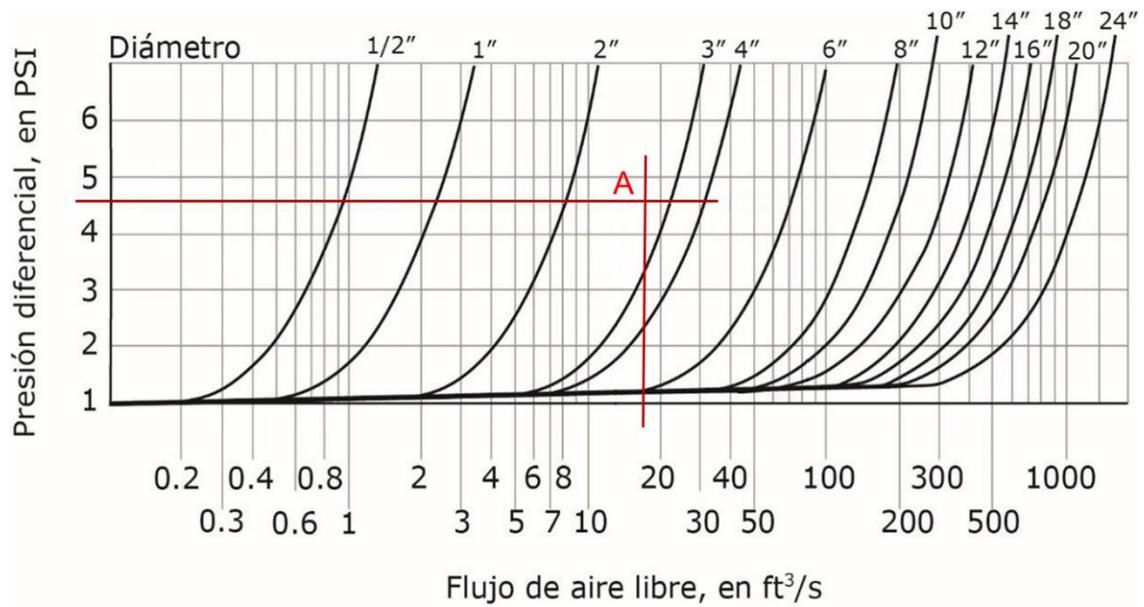


Figura A8.5 Una válvula con diámetro mayor o igual a 3" tiene la capacidad de permitir el caudal máximo de aire demandado

A9 Modelo matemático de válvulas de movimiento controlado

El modelo de la operación de la válvula se plantea para los siguientes casos:

- cuando la válvula está completamente cerrada
- cuando la válvula está parcialmente abierta o en movimiento.

A9.1 Válvula completamente cerrada

Cuando la válvula está completamente cerrada, en las secciones de la tubería inmediatas aguas arriba y aguas abajo de la válvula, indicadas como punto 1 y punto 2 en la Figura A9.1, el gasto es cero (Ecuación A9.1); las cargas, se obtienen a través de las ecuaciones A9.2 y A9.3, las que a su vez se obtienen de las ecuaciones características, Ecuación A4.1 y Ecuación A4.2.

$$Q_{1t+\Delta t} = Q_{2t+\Delta t} = 0 \quad (\text{A9.1})$$

$$H_{1t+\Delta t} = \frac{c_p}{c_{a_i}} \quad (\text{A9.2})$$

$$H_{2t+\Delta t} = -\frac{c_n}{c_{a_{i+1}}} \quad (\text{A9.3})$$

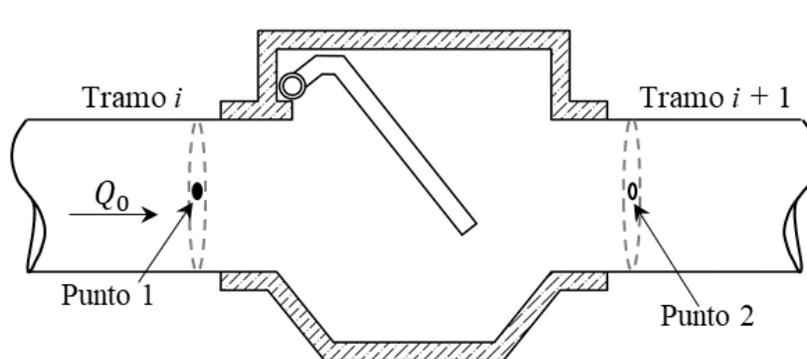


Figura A9.1 Secciones inmediatamente aguas arriba y abajo de la válvula

A9.2 Válvula parcialmente abierta o en movimiento.

Cuando la válvula está parcialmente abierta o está en movimiento, introduce una diferencia de carga en las secciones inmediatas aguas arriba y aguas abajo de ella que depende de su grado de apertura, la relación entre las cargas en el tiempo $t + \Delta t$ está dada por la Ecuación A9.4. Cuando no cambia la apertura de la válvula el coeficiente de pérdida es constante, a diferencia de cuando está en movimiento.

$$H_{1_{t+\Delta t}} - H_{2_{t+\Delta t}} = K_{V_{t+\Delta t}} Q_{V_{t+\Delta t}} |Q_{V_{t+\Delta t}}| \quad (\text{A9.4})$$

Los gastos en esas secciones son iguales entre sí e iguales al gasto que pasa a través de la válvula, ecuaciones A9.5 y A9.6

$$Q_{1_{t+\Delta t}} = Q_{2_{t+\Delta t}} \quad (\text{A9.5})$$

$$Q_{1_{t+\Delta t}} = Q_{V_{t+\Delta t}} \quad (\text{A9.6})$$

donde

$H_{i_{t+\Delta t}}$ es la carga en el punto i en el tiempo $t + \Delta t$, en m

$Q_{i_{t+\Delta t}}$ es el gasto en el punto i en el tiempo $t + \Delta t$, en m^3/s

$Q_{V_{t+\Delta t}}$ es el gasto a través de la válvula en el tiempo $t + \Delta t$, en m^3/s

$K_{V_{t+\Delta t}}$ es el coeficiente de pérdida de carga que introduce la válvula en el tiempo $t + \Delta t$, en s^2/m^5

El sistema determinado por las tres ecuaciones A9.4 a A9.6 contiene a las cinco incógnitas

$Q_{V_{t+\Delta t}}$, $Q_{1_{t+\Delta t}}$, $Q_{2_{t+\Delta t}}$, $H_{1_{t+\Delta t}}$, $H_{2_{t+\Delta t}}$, éste se completa con las ecuaciones características A4.1 y A4.2. A través del método de sustitución el sistema se reduce a la ecuación de segundo grado A9.7.

$$K_{V_{t+\Delta t}} |Q_{V_{t+\Delta t}}| Q_{V_{t+\Delta t}} + \left(\frac{1}{c_{a_i}} + \frac{1}{c_{a_{i+1}}} \right) Q_{V_{t+\Delta t}} - \frac{c_n}{c_{a_{i+1}}} - \frac{c_p}{c_{a_i}} = 0 \quad (\text{A9.7})$$

donde

c_p es el parámetro de la característica positiva, en m^3/s

c_n es el parámetro de la característica negativa, en m^3/s

c_{a_j} es la constante del método de las características del tramo j , en m^2/s

Cuando la válvula está en movimiento, debe determinarse para cada intervalo de integración (Δt) el coeficiente de pérdida de carga $K_{V_{t+\Delta t}}$, el cual se obtiene a partir de la información que proporcionan los fabricantes de válvulas a través de gráficas como la de la Figura A9.2. En el sistema TransDocencia se considera el movimiento de las válvulas (cierre o apertura) con velocidad constante.

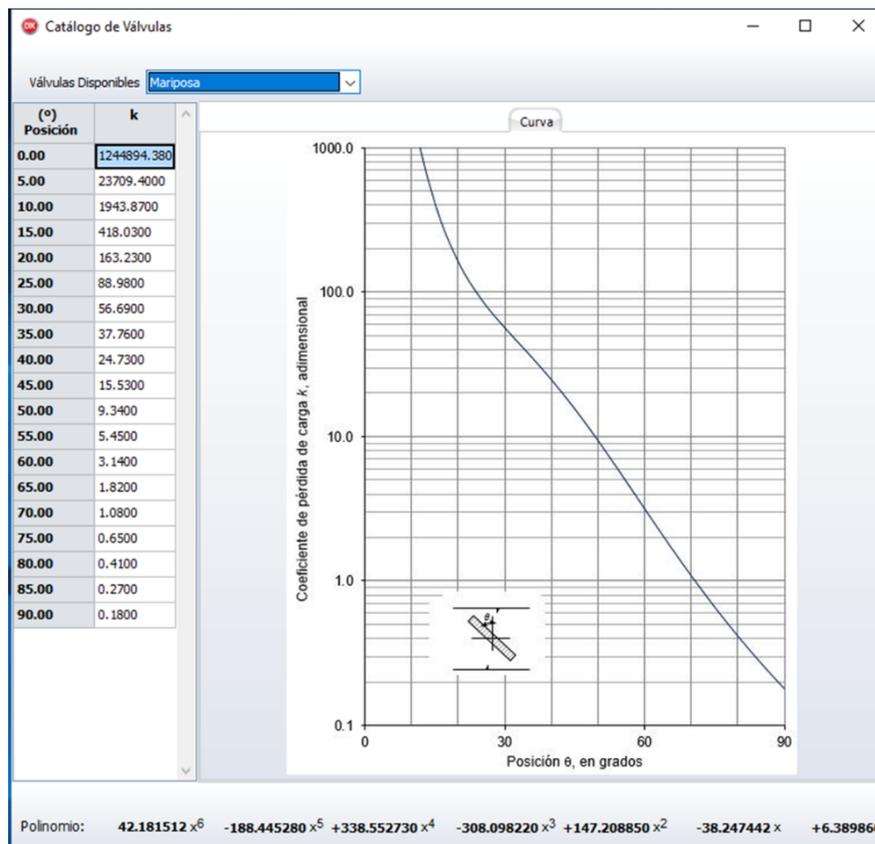


Figura A9.2 Coeficiente de pérdida de carga en función del ángulo de apertura

En el sistema TransDocencia, el coeficiente de pérdida de la válvula se obtiene a través de la Ecuación A9.8.

$$K_V = K_{min} 10^{P(\tau)} \quad (A9.8)$$

donde

K_V es el coeficiente de pérdida de carga que introduce la válvula, en s^2/m^5

K_{min} es el coeficiente de pérdida de carga que introduce la válvula cuando está totalmente abierta, en s^2/m^5

τ variable adimensional

$P(\tau)$ polinomio de sexto grado

Cuando el coeficiente de pérdida de la válvula está en función de la posición angular (θ) del elemento que obstruye el paso del agua (como en la Figura A9.2), entonces se define $\tau = \theta/90$. Cuando está en función del porcentaje de apertura (y), entonces se define $\tau = y/100$. En ambos casos, para la válvula completamente abierta $\tau = 1$ y cuando está totalmente cerrada $\tau = 0$.

El polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3 + a_4\tau^4 + a_5\tau^5 + a_6\tau^6$ se obtiene a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de la curva determinada por el conjunto de puntos $(\tau, \log(k/k_{min}))$ que se obtienen de la curva de pérdida de carga como la mostrada en la Figura A9.2, donde k_{min} es el coeficiente mínimo de pérdida adimensional.

El polinomio con el que se determina la pérdida en la válvula en TransDocencia, se muestra en la parte inferior de la Figura A9.2. Hay dos condiciones necesarias que debe cumplir el polinomio para representar adecuadamente el movimiento de una válvula de control.

1. El valor absoluto de la suma de sus coeficientes debe ser menor o igual a 0.05, como se indica en la Ecuación A9.9.

$$|a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6| \leq 0.05 \quad (A9.9)$$

2. El término independiente debe ser mayor que uno, Ecuación A9.10.

$$a_0 > 1 \quad (A9.10)$$

A10 Operación de equipos de bombeo en flujo transitorio

La función de las bombas hidráulicas es transformar energía mecánica en energía hidráulica. La energía mecánica proviene de otro tipo de energía que, en los sistemas de conducción de agua es muy común que sea energía eléctrica, razón por la que en este trabajo se hará referencia a la energía eléctrica.

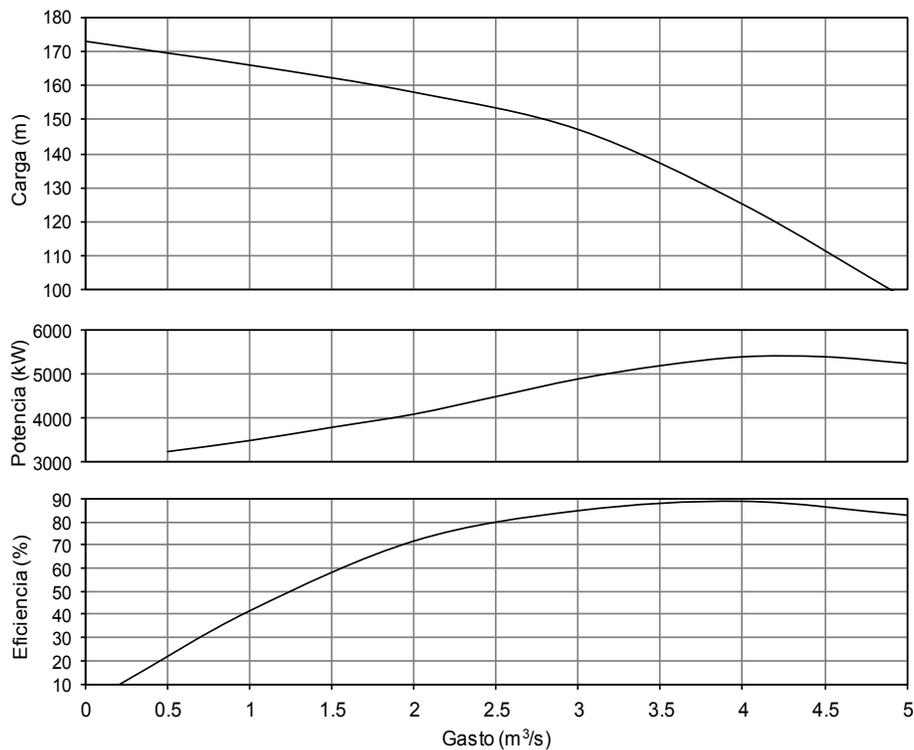


Figura A10.1 Curvas características de operación de una bomba de eje horizontal, dble succión, de velocidad específica $N_s = 46 \text{ (rpm (m}^3/\text{s})^{0.5} \text{ m}^{-0.75})$

Mientras exista suministro de energía eléctrica, la velocidad de giro de las bombas es constante y la operación del sistema hidráulico es estable o permanente, considerando que no se realiza maniobra alguna para modificar el estado de operación. Los fabricantes de bombas representan la operación de las bombas a través de curvas carga vs gasto, potencia vs gasto, eficiencia vs gasto y el nivel mínimo de succión requerido (NPSH, siglas en inglés) para evitar cavitación, también en función del gasto. Las unidades de las variables dependen del lugar de fabricación de las bombas, es común que el gasto se presente en

galones por minuto (gpm), litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por segundo (m^3/s), la carga y el NPSH en pies (ft) o metros (m) y la potencia en caballos de fuerza (hp) o kilo Watts (kW), como se muestra en las Figuras A10.1 y A10.2.

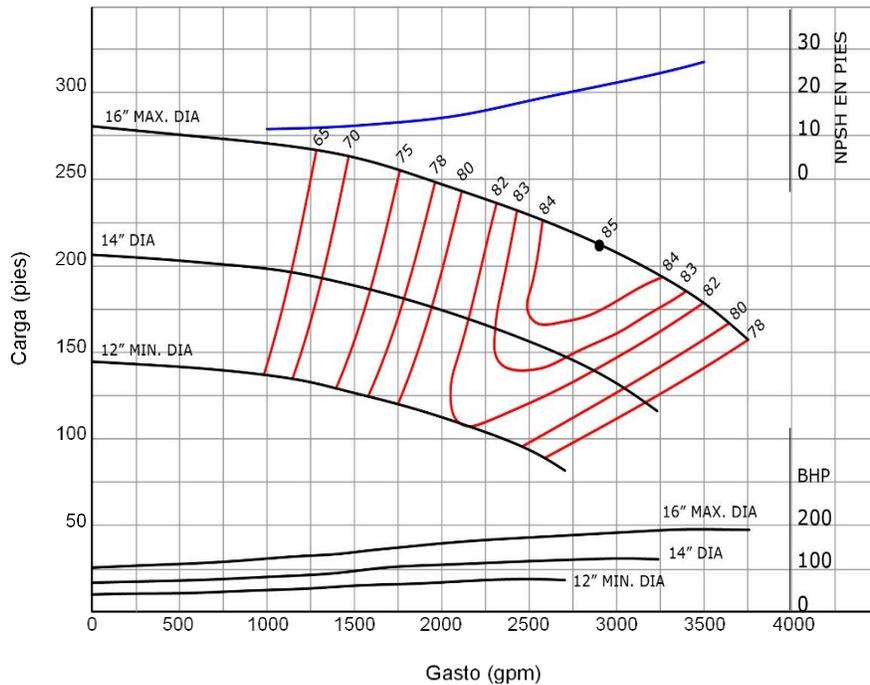


Figura A10.2 Curvas características de operación de una bomba con velocidad específica $N_s = 93.6$ ($\text{rpm} (\text{m}^3/\text{s})^{0.5} \text{m}^{-0.75}$)

A10.1 Velocidad específica

La velocidad específica es un número que se determina con la Ecuación A10.1, a través de este número se relacionan las variables gasto, carga y velocidad de diseño de las bombas.

El valor de la velocidad específica permite determinar el tipo de rodete y eficiencia esperada a través de la Figura A10.3, en la que se muestran los valores medios de eficiencia obtenidos para un gran número de bombas comerciales en función de la velocidad específica y el gasto (KSB Compañía Sudamericana de Bombas S. A., 2002), cada clase o familia de bombas tiene asociado un intervalo de valores de velocidad específica.

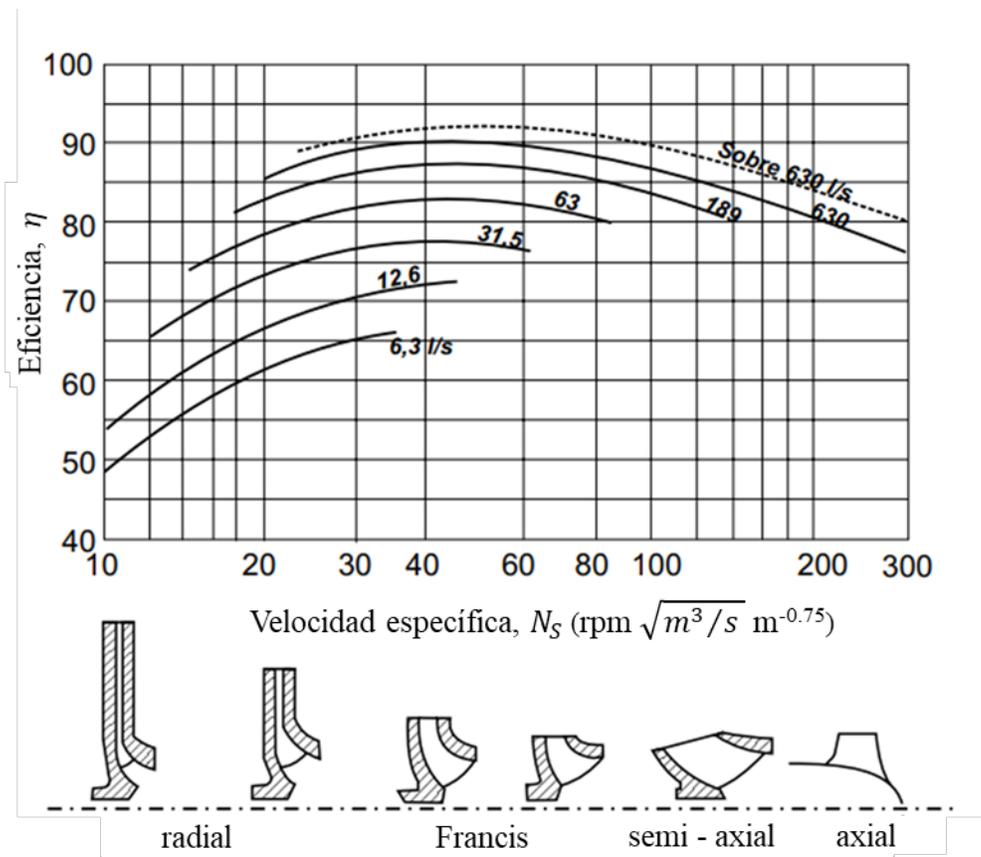


Figura A10.3 Tipo de rodete para diferentes velocidades específicas (KSB, 2002)

$$N_S = N_R \frac{\sqrt{\frac{Q_R}{n}}}{\left(\frac{H_R}{m}\right)^{0.75}} \quad (\text{A10.1})$$

donde

N_S es la velocidad específica de la bomba, en rpm $(\text{m}^3/\text{s})^{0.5} \text{m}^{-0.75}$ o rpm $(\text{gpm})^{0.5} \text{ft}^{-0.75}$

N_R es la velocidad de rotación de diseño o nominal de la bomba, en rpm

Q_R es el gasto que entrega la bomba en operación a máxima eficiencia, en m^3/s o gpm

H_R es la carga que entrega la bomba en operación a máxima eficiencia, en m o ft

$n = 1$ cuando la bomba es de una succión

$n = 2$ cuando la bomba es de doble succión

m número de impulsores, pasos o tazones

Las gráficas de la Figura A10.1 son para un único diámetro de impulsor, a diferencia de la Figura A10.2 en la que se presenta información para tres diámetros del impulsor (12”, 14” y 16”); en ambos casos, el tipo de bomba se identifica a través de su velocidad específica que se calcula con la Ecuación A10.1. Debido a que la velocidad específica se determina con el punto de diseño de la bomba (punto de operación con el que trabaja a máxima eficiencia) es la misma para los tres impulsores de la Figura A10.2.

Cada una de las curvas de las Figuras A10.1 y A10.2, pueden representarse a través de polinomios. Es muy común que con polinomios de tercer grado se obtenga una buena aproximación.

En la Figura A10.4 muestra la fotografía de dos bombas de eje vertical de succión simple (una succión) y cuatro pasos o tazones.



Figura A10.4 Bombas verticales de succión simple y cuatro pasos (cuatro tazones), Santa Rosa León, Guanajuato. Cortesía de Eduardo Rodal

En la Figura A10.5 se muestra una bomba de eje horizontal de doble succión y dos pasos (dos impulsores o doble impulsión). El caudal en la tubería de succión se divide en dos (doble succión) para ingresar a la bomba y ser impulsado por dos rodetes (se impulsa en dos pasos). En la Figura A10.6 se muestra la pareja de impulsores para cada succión de la bomba de la Figura A10.5.

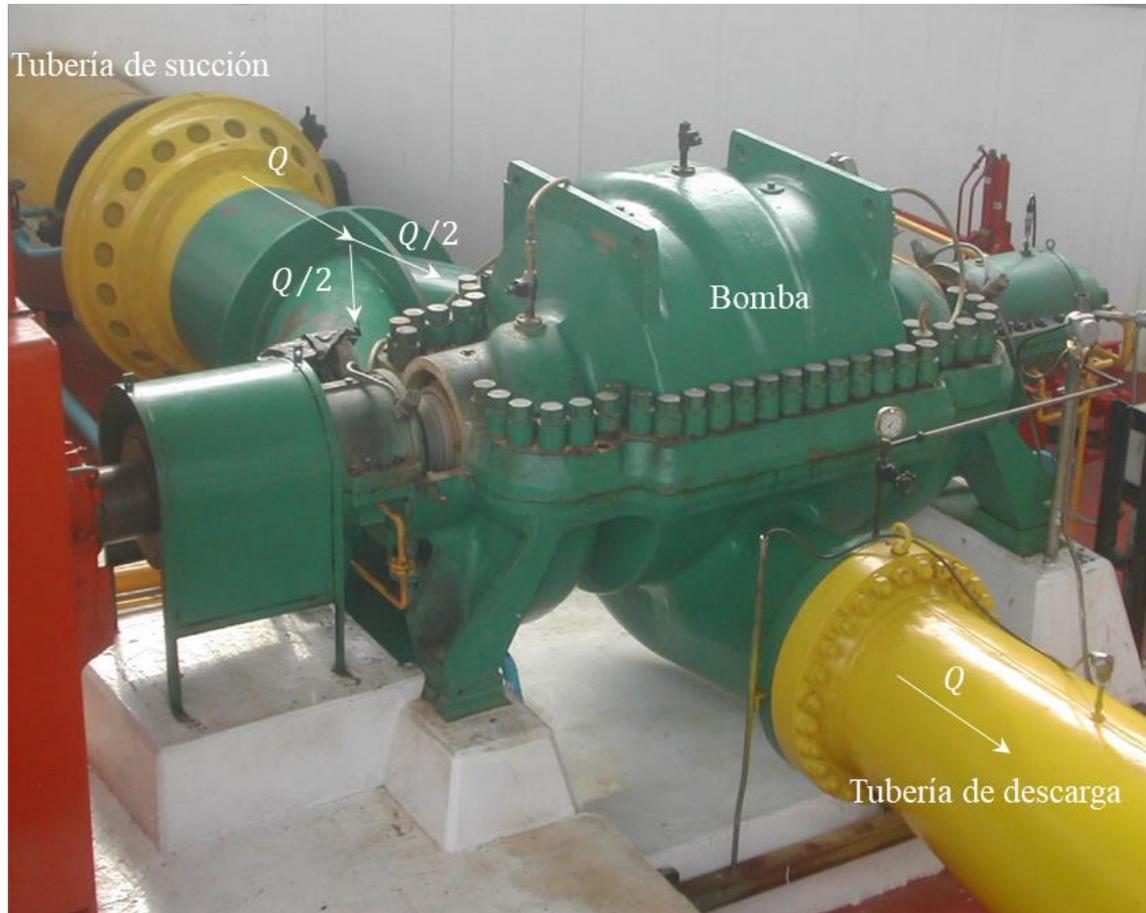


Figura A10.5 Bomba horizontal de doble succión y doble impulsión (o dos pasos) del Sistema Cutzamala, Edo de Méx., México. Cortesía de Eduardo Rodal

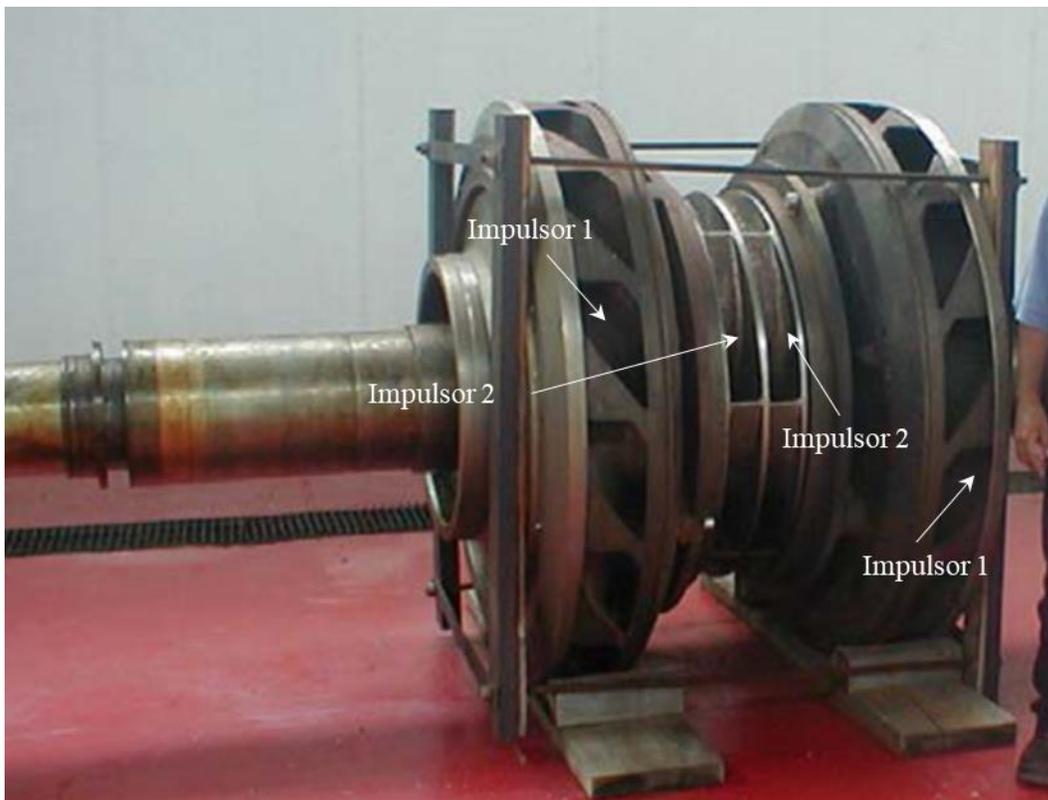


Figura A10.6 Impulsores de la bomba de la Figura A10.5. Cortesía de Eduardo Rodal

A10.2 Operación de bombas con flujo transitorio

Cuando se suspende el suministro de energía eléctrica la velocidad de la bomba no puede mantenerse constante, ésta variará en función del flujo de agua que pasa a través de ella y de los momentos de inercia de la misma bomba y del motor eléctrico. La operación de la bomba pasa de ser permanente a transitoria, esta última forma de operación se representa a través de gráficas como las de las Figuras A10.7 y A10.8 a las que se les conoce como curvas de cuatro cuadrantes.

Cuando la válvula en la descarga de la bomba es de no retorno (check), tanto el flujo como la velocidad de la bomba no pueden ser negativos, por lo que la operación de la bomba queda representada por la información del primer cuadrante de las gráficas de las Figuras A10.7 y A10.8.

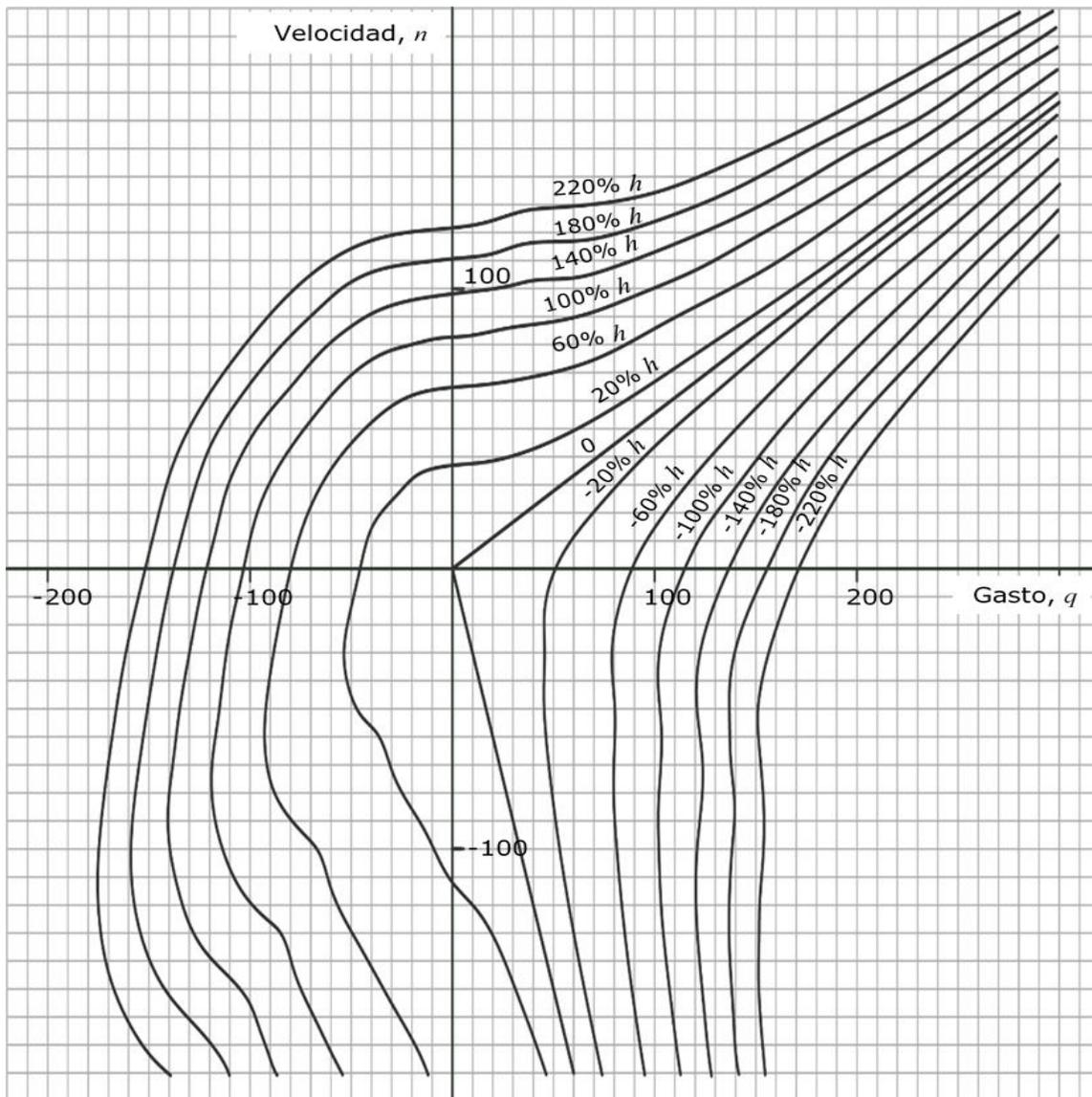


Figura A10.7 Curva de carga para la operación en flujo transitorio de una bomba de velocidad específica $N_s = 49$ ($\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{m}^{-0.75}$) (Guarga *et al.*, 1984)

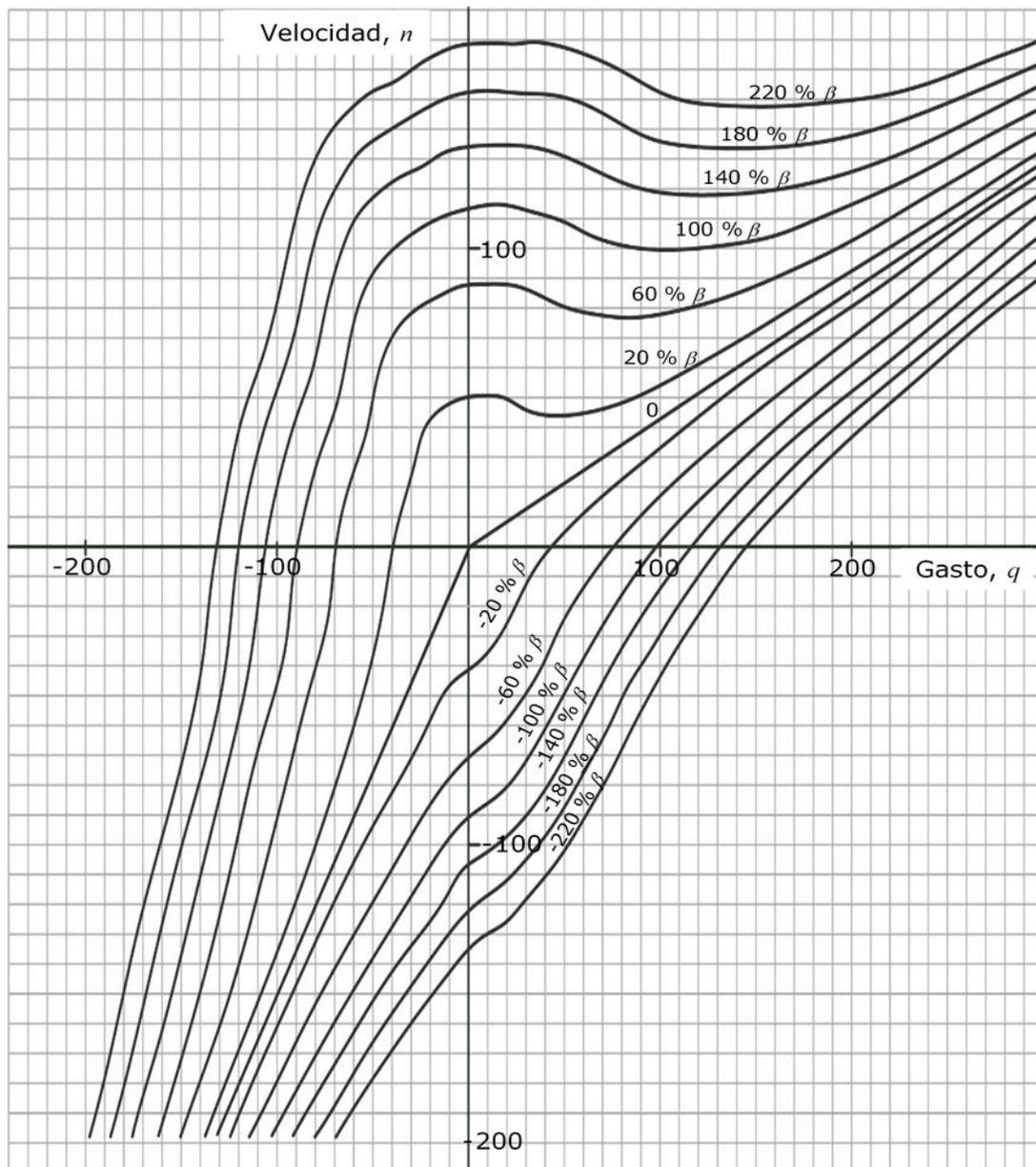


Figura A10.8 Curva de momento o par para la operación en flujo transitorio de una bomba de velocidad específica $N_s = 49$ ($\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{m}^{-0.75}$) (Guarga *et al.*, 1984)

Las curvas de cuatro cuadrantes relacionan a las variables adimensionales de carga (h), gasto (q), velocidad (n) y par o momento (β) definidas a través de las ecuaciones A10.2 a A10.5.

$$h = \frac{H}{H_R} \quad (\text{A10.2})$$

$$q = \frac{Q}{Q_R} \quad (\text{A10.3})$$

$$n = \frac{N}{N_R} \quad (\text{A10.4})$$

$$\beta = \frac{T}{T_R} \quad (\text{A10.5})$$

donde

N_R es la velocidad de diseño de la bomba, en rpm

T_R es el torque, momento angular o par aplicado al eje de la bomba en operación con máxima eficiencia, en Nm o lb-ft

H es la carga que entrega la bomba, en m o ft

Q es el gasto en la bomba, en m³/s o gpm

N es la velocidad de la bomba, en rpm

T es el torque, momento angular o par aplicado al eje de la bomba, en Nm o lb-ft

h es la carga, adimensional

q es el gasto, adimensional

n es la velocidad de la bomba, adimensional

β es el torque, momento angular o par, adimensional

La información que proporcionan todas las curvas de las Figuras A10.7 y A10.8 puede representarse a través de las funciones definidas en las ecuaciones A10.6 y A10.7, respectivamente, las que dependen del ángulo definido por la Ecuación A10.8, en Carmona & Carmona (2013) se presenta el procedimiento para obtener las funciones. A la función f_h se le conocen como función característica de carga y a f_β como función característica de momento, par o torque.

$$f_h(\theta) = \frac{h}{n^2 + q^2} \quad (\text{A10.6})$$

$$f_\beta(\theta) = \frac{\beta}{n^2 + q^2} \quad (\text{A10.7})$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{n}{q}\right) \quad (\text{A10.8})$$

donde

- f_h función característica de carga, adimensional
 f_β función característica de par o momento, adimensional
 θ ángulo en grados

En el sistema TransDocencia, la operación de las bombas en flujo transitorio se representa con las funciones características de carga (f_h) y momento o par (f_β) definidas por las ecuaciones A10.6 y A10.7, dadas a través de tablas de datos como la Tabla A10.1.

Tabla A10.1 Funciones características de carga y momento, (Carmona & Carmona, 2013)

θ°	$N_s = 38$		$N_s = 44$		$N_s = 46$	
	f_h	f_β	f_h	f_β	f_h	f_β
0	-0.530	-0.350	-0.574	-1.045	-0.530	-0.350
5	-0.461	-0.265	-0.550	-0.825	-0.476	-0.265
10	-0.392	-0.180	-0.500	-0.583	-0.392	-0.180
15	-0.271	-0.072	-0.403	-0.354	-0.291	-0.062
20	-0.150	0.037	-0.276	-0.134	-0.150	0.037
25	-0.038	0.133	-0.124	0.045	-0.037	0.135
30	0.075	0.228	0.023	0.176	0.075	0.228
35	0.199	0.309	0.160	0.309	0.200	0.320
40	0.322	0.390	0.316	0.405	0.320	0.410
45	0.500	0.500	0.505	0.501	0.500	0.500
50	0.678	0.579	0.669	0.577	0.650	0.555
55	0.834	0.619	0.839	0.640	0.810	0.604
60	0.989	0.658	0.968	0.680	0.930	0.625
65	1.112	0.657	1.084	0.700	1.050	0.640
70	1.234	0.656	1.220	0.713	1.170	0.643
75	1.307	0.611	1.272	0.735	1.250	0.645

N_s en rpm $m^{1.5}/s^{0.5} m^{-0.75}$ (continua)

Tabla A10.1 Funciones características de carga y momento (continuación)

θ°	$N_S = 38$		$N_S = 44$		$N_S = 46$	
	f_h	f_β	f_h	f_β	f_h	f_β
80	1.380	0.566	1.373	0.750	1.330	0.640
85	1.427	0.518	1.408	0.767	1.370	0.630
90	1.473	0.470	1.472	0.778	1.410	0.620
95	1.472	0.501	1.502	0.786	1.420	0.635
100	1.470	0.532	1.513	0.824	1.440	0.690
105	1.464	0.574	1.462	0.835	1.445	0.760
110	1.457	0.615	1.427	0.861	1.450	0.820
115	1.429	0.718	1.425	0.876	1.440	0.890
120	1.400	0.820	1.418	0.923	1.420	0.960
125	1.376	0.883	1.411	1.011	1.400	1.020
130	1.351	0.946	1.380	1.099	1.350	1.080
135	1.301	0.997	1.366	1.200	1.310	1.143
140	1.251	1.047	1.318	1.300	1.245	1.180
145	1.178	1.069	1.310	1.400	1.180	1.178
150	1.105	1.090	1.257	1.420	1.100	1.165
155	0.990	1.069	1.215	1.407	1.030	1.140
160	0.875	1.048	1.154	1.427	0.940	1.110
165	0.780	0.987	1.097	1.403	0.850	1.070
170	0.685	0.925	1.065	1.340	0.750	1.030
175	0.664	0.904	1.033	1.288	0.700	0.990
180	0.642	0.882	0.972	1.262	0.667	0.950
185	0.620	0.861	0.919	1.216	0.665	0.910
190	0.598	0.840	0.849	1.157	0.660	0.860
195	0.587	0.794	0.778	1.067	0.650	0.810
200	0.576	0.748	0.709	0.967	0.630	0.750
205	0.551	0.684	0.624	0.830	0.600	0.670
210	0.525	0.620	0.555	0.687	0.550	0.600
215	0.503	0.535	0.485	0.547	0.510	0.500
220	0.481	0.450	0.454	0.382	0.480	0.400
225	0.487	0.344	0.434	0.287	0.460	0.300
230	0.493	0.238	0.431	0.168	0.470	0.190
235	0.529	0.134	0.422	0.062	0.490	0.100
240	0.565	0.030	0.392	-0.104	0.530	0.010
245	0.607	-0.084	0.354	-0.292	0.570	-0.090
250	0.649	-0.198	0.313	-0.476	0.620	-0.200
255	0.676	-0.283	0.271	-0.643	0.660	-0.320
260	0.702	-0.368	0.239	-0.863	0.690	-0.450
265	0.711	-0.506	0.199	-1.030	0.715	-0.575
270	0.719	-0.644	0.192	-1.208	0.740	-0.700

 N_S en $\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{ m}^{-0.75}$

En la Figura A10.9 se muestran las curvas características de carga y momento para una bomba de velocidad específica $N_S = 44$ ($\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{ m}^{-0.75}$).

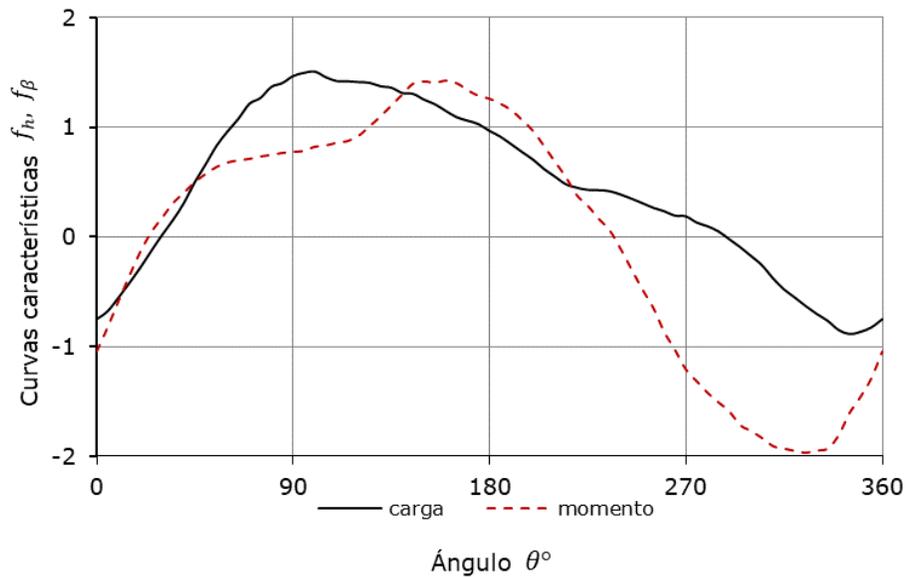


Figura A10.9 Curvas características de carga y momento, $N_S = 44$ ($\text{rpm m}^{1.5}/\text{s}^{0.5} \text{ m}^{-0.75}$)

A10.3 Modelo matemático

El disparo, paro súbito o paro de emergencia de equipos de bombeo ocurre cuando se suspende el suministro de energía a las bombas. En ese caso, la velocidad de las bombas depende del flujo que las atraviesa y de los momentos de inercia del motor eléctrico y de las mismas bombas, la que se determina a través de la ecuación dinámica A10.9 también conocida como de las masas rodantes.

$$T = -WR^2 \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{A10.9})$$

donde

WR^2 momento angular de inercia total (bomba, motor y agua que pasa por la bomba, determinado con el radio del impulsor de la bomba y masa), en kg m^2

ω velocidad angular de la bomba, en rad/s

Al escribir la velocidad angular de la bomba en revoluciones por minuto, la ecuación A10.9 se escribe como la Ecuación A10.10.

$$T = -WR^2 \frac{2\pi dN}{60 dt} \quad (\text{A10.10})$$

Al sustituir las definiciones de la velocidad y el torque adimensionales (ecuaciones A10.4 y A10.5), escribir la derivada como el cociente del cambio de la velocidad adimensional entre el intervalo de tiempo en el que ocurre el cambio y se considera el promedio del torque adimensional en ese intervalo de tiempo, la Ecuación A10.10 toma la forma de la Ecuación A10.11 (Chaudhry, 1979).

$$\frac{n_{t+\Delta t} - n_t}{\Delta t} = \frac{60 T_R}{2\pi WR^2 N_R} \frac{\beta_{t+\Delta t} + \beta_t}{2} \quad (\text{A10.11})$$

donde

n_i es la velocidad de la bomba en el tiempo i , adimensional

β_i es el torque en el tiempo i , adimensional

El momento de inercia del conjunto motor-bomba TransDocencia lo determina con la Ecuación A10.12 tomando en consideración la Ecuación A10.13 (Thorley, 1991).

$$WR^2 = 0.03768 \left(\frac{P}{N_R^3} \right)^{0.9556} + 0.0043 \left(\frac{P}{N_R} \right)^{1.48} \quad (\text{A10.12})$$

$$P = \frac{\rho g Q_R H_R}{\eta} \quad (\text{A10.13})$$

donde

P es la potencia mecánica en la operación con máxima eficiencia, en kW

N_R es la velocidad de diseño de la bomba, en miles de rpm

η es la eficiencia máxima

ρ es la densidad del fluido, en kg/m³

g es la aceleración de la gravedad, en m/s²

Como se mencionó anteriormente, ante la falta de energía eléctrica, la velocidad de la bomba variará en función del flujo de agua que pasa a través de ella y de los momentos de inercia de la misma bomba y del motor eléctrico, como resultado la carga que entrega también estará cambiando. La relación que existe entre la carga (h), el gasto (q), la velocidad (n) y el par (β), está dada por las funciones características de carga y momento (Ecuación A10.6 a la Ecuación A10.8) cuyos valores se obtienen a través de los datos de la Tabla A10.1.

Cuando la velocidad de la bomba y el gasto que pasa a través de ella determinan un ángulo θ (Ecuación A10.8) cuyo valor no está en la Tabla A10.1, las funciones características de carga (f_h) y momento (f_β) se obtienen a través de las interpolaciones lineales dadas por la Ecuación A10.14 y Ecuación A10.15 respectivamente.

$$f_h(\theta) = a_1 + a_2 \tan^{-1} \left(\frac{n}{q} \right) \quad (\text{A10.14})$$

$$f_\beta(\theta) = a_3 + a_4 \tan^{-1} \left(\frac{n}{q} \right) \quad (\text{A10.15})$$

Las constantes a_1 , a_2 , a_3 y a_4 se obtienen con la Ecuación A10.16 a la Ecuación A10.19.

$$a_1 = f_h(\theta_1) - \left(\frac{f_h(\theta_2) - f_h(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \right) \theta_1 \quad (\text{A10.16})$$

$$a_2 = \frac{f_h(\theta_2) - f_h(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{A10.17})$$

$$a_3 = f_\beta(\theta_1) - \left(\frac{f_\beta(\theta_2) - f_\beta(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \right) \theta_1 \quad (\text{A10.18})$$

$$a_4 = \frac{f_\beta(\theta_2) - f_\beta(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{A10.19})$$

Donde los ángulos θ_1 y θ_2 para los que sí hay información, determinan el intervalo que contiene al ángulo θ , para el que se está buscando el valor de las funciones características.

En el tiempo $t + \Delta t$, la carga aguas abajo de la válvula de descarga de la bomba, punto 2 de la Figura A10.10, se determina a través de la Ecuación A10.20 y por continuidad se satisface la Ecuación A10.21. El gasto que entrega la bomba está dado por la Ecuación A10.22.

Para las secciones de la tubería, aguas arriba y abajo del conjunto bomba-válvula de descarga, la relación entre la carga y el gasto está dada por las ecuaciones características del punto 1 y el punto 2 de la Figura A10.21, ecuaciones A4.1 y A4.2.

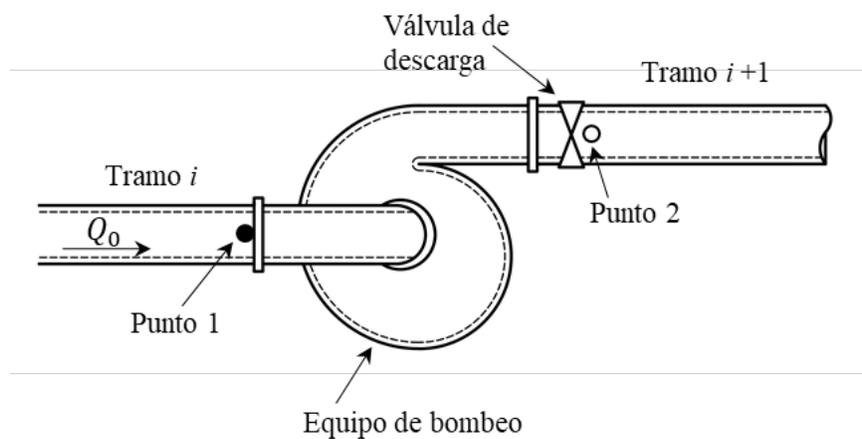


Figura A10.10 Bomba entre dos tramos de la conducción (hay línea de sumergencia)

$$H_{2_{t+\Delta t}} = H_{1_{t+\Delta t}} + H_R h_{t+\Delta t} - K_{V_{t+\Delta t}} Q_R^2 |q_{t+\Delta t}| q_{t+\Delta t} \quad (\text{A10.20})$$

$$Q_{1_{t+\Delta t}} = Q_{2_{t+\Delta t}} \quad (\text{A10.21})$$

$$Q_{2_{t+\Delta t}} = Q_R q_{t+\Delta t} \quad (\text{A10.22})$$

donde

$K_{V_{t+\Delta t}}$ es el coeficiente de pérdida de carga que introduce la válvula de descarga, en s^2/m^5

El sistema de ecuaciones que determinan el modelo de la operación en flujo transitorio de una bomba está formado por las ecuaciones A10.11, A10.14, A10.15, A10.20 a A10.22, A4.1 y A4.2, es un sistema de ocho incógnitas con las variables $Q_{1t+\Delta t}$, $Q_{2t+\Delta t}$, $H_{1t+\Delta t}$, $H_{2t+\Delta t}$, $q_{t+\Delta t}$, $h_{t+\Delta t}$, $n_{t+\Delta t}$ y $\beta_{t+\Delta t}$.

Para válvulas de cierre controlado el coeficiente $K_{V_{t+\Delta t}}$ se obtiene a través de la Ecuación A9.8. Para válvulas de no retorno, cuando el sentido del flujo es igual al del flujo en estado permanente $K_{V_{t+\Delta t}}$ es igual al coeficiente de pérdida mínimo de la válvula, en s^2/m^5 , cuando el agua se regresa hacia la bomba el sistema TransDocencia le asigna el valor 10^{12} .

A través de operaciones algebraicas el sistema puede reducirse al sistema de ecuaciones A10.23 y A10.24 cuyas variables son n_P y q_P , en el que además de haber sustituido el subíndice $t + \Delta t$ por P , se ha considerado el caso en el que hay N_B número de bombas operando en paralelo, las cuales todas dejan de operar simultáneamente (la Ecuación A10.22 cambia por $Q_{2t+\Delta t} = N_B Q_R q_{t+\Delta t}$). Este sistema puede resolverse con el método iterativo de Newton-Raphson.

$$K_{V_P} Q_R^2 |q_P| q_P + \left(\frac{1}{C_{a_1}} + \frac{1}{C_{a_2}} \right) N_B Q_R q_P - H_R (n_P^2 + q_P^2) \left[a_1 + a_2 \tan^{-1} \left(\frac{n_P}{q_P} \right) \right] - \frac{C_P}{C_{a_1}} - \frac{C_n}{C_{a_2}} = 0 \quad (\text{A10.23})$$

$$\frac{\pi N_R W R^2}{15 T_R \Delta t} \left\{ (n_P^2 + q_P^2) \left[a_3 + a_4 \tan^{-1} \left(\frac{n_P}{q_P} \right) \right] + \beta \right\} + n_P - n = 0 \quad (\text{A10.24})$$

donde

N_B es el número de bombas iguales operando en paralelo

Una vez que se han calculado los valores de n_P y q_P , las demás variables se calculan realizando sustituciones en las demás ecuaciones.

Para el caso en el que la planta de bombeo determina la frontera aguas arriba del acueducto, el sistema de ecuaciones está formado por la característica negativa, Ecuación A4.2 y las ecuaciones A10.11, A10.14, A10.15, A10.25 y A10.26, ver Figura A10.11 y Figura A10.12.

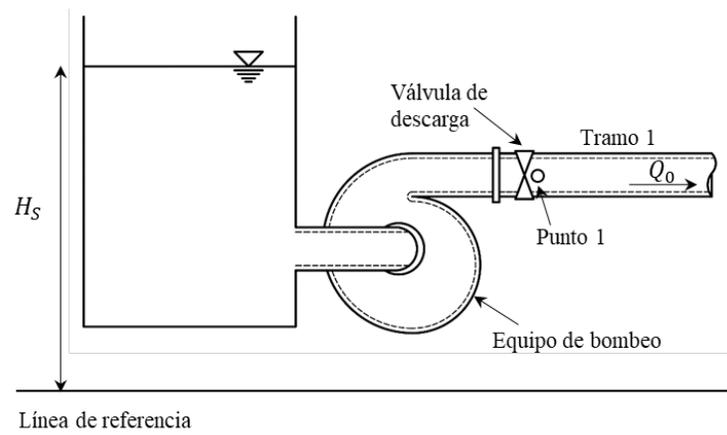


Figura A10.11 Bomba de eje horizontal en la frontera aguas arriba (sin línea de sumergencia)

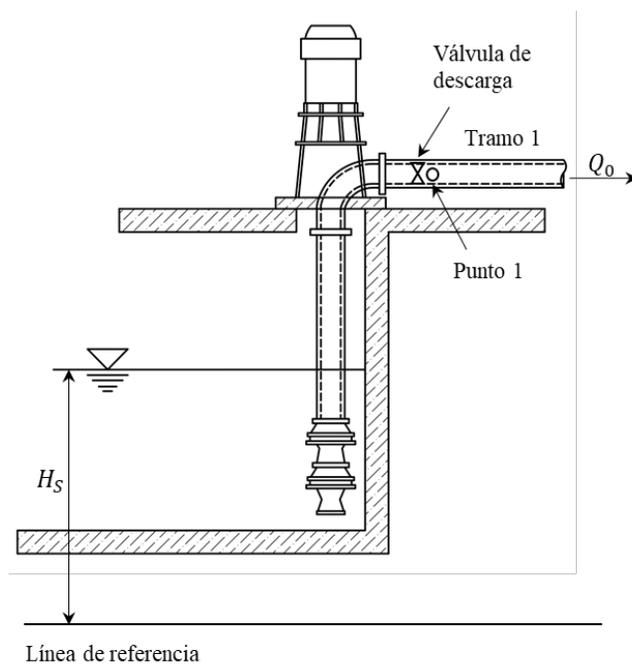


Figura A10.12 Bomba de eje vertical en la frontera aguas arriba

$$H_{1_{t+\Delta t}} = H_S + H_R h_{t+\Delta t} - K_{V_{t+\Delta t}} Q_R^2 |q_{t+\Delta t}| q_{t+\Delta t} \quad (\text{A10.25})$$

$$Q_{1_{t+\Delta t}} = Q_R q_{t+\Delta t} \quad (\text{A10.26})$$

donde

H_S es la carga de succión

Se tiene un sistema de seis ecuaciones con las seis incógnitas $Q_{1_{t+\Delta t}}$, $H_{1_{t+\Delta t}}$, $q_{t+\Delta t}$, $h_{t+\Delta t}$, $n_{t+\Delta t}$ y $\beta_{t+\Delta t}$, el cual puede reducirse al sistema de ecuaciones A10.24 y A10.27 y resolverse con el método iterativo de Newton-Raphson. El valor del coeficiente $K_{V_{t+\Delta t}}$ se determina como ya se indicó.

$$H_R(n_P^2 + q_P^2) \left[a_1 + a_2 \tan^{-1} \left(\frac{n_P}{q_P} \right) \right] - K_{V_P} Q_R^2 |q_P| q_P - \frac{N_B Q_R}{c_a} q_P + \frac{C_n}{C_a} + H_S = 0 \quad (\text{A10.27})$$

Una vez determinados los valores de n_P y q_P , las demás variables se calculan realizando sustituciones en las demás ecuaciones.

Notación

Sección transversal de tuberías: A

Sección transversal de tanques o torres: A_T

Celeridad: a

Constante del método de las características: c_a

Constante del método de las características: c_f

Parámetro de la característica negativa: c_n

Parámetro de la característica positiva: c_p

Diámetro de la tubería: D

Módulo de elasticidad del material de la tubería: E_t

Módulo de elasticidad volumétrica del agua: E_V

Espesor de la tubería: e

Valor de la variable F en la posición $x-\Delta x$ en el tiempo t : F_A

Valor de la variable F en la posición $x+\Delta x$ en el tiempo t : F_B

Valor de la variable F en la posición x en el tiempo $t+\Delta t$: F_P

Factor de fricción de Darcy-Weisbach de la tubería: f

Función característica de carga, adimensional: f_h

Función característica de par o momento, adimensional: f_β

Aceleración de la gravedad: g

Carga piezométrica: H

Carga de la bomba: H_B

Carga estática: H_E

Carga de diseño de la bomba: H_R

Carga de succión: H_S

Carga, adimensional: h

Término inercial: I

Constante de pérdida de carga: K

Coefficiente de pérdida de carga que introduce la válvula cuando está totalmente abierta: K_{\min}

Coefficiente de pérdida de carga en válvulas: K_v

Longitud de tuberías, longitud de la conducción: L

Mitad de la amplitud de la oscilación: M

Velocidad de la bomba: N

Número de bombas iguales operando en paralelo: N_B

Velocidad de diseño de la bomba: N_R

Velocidad específica: N_S

Velocidad de la bomba, adimensional: n

Potencia mecánica en la operación con máxima eficiencia: P

Polinomio de sexto grado: $P(\tau)$

Presión absoluta del aire en la cámara: p

Presión atmosférica: p_a

Gasto: Q

Gasto de diseño de la bomba: Q_R

Gasto, adimensional: q

Radio de la tubería: R

Número de Reynolds: R_e

Superficie libre del agua: SLA

Periodo de una onda; torque, momento angular o par aplicado al eje de la bomba: T

Torque, momento angular o par aplicado al eje de la bomba en operación con máxima eficiencia: T_R

Tiempo: t

Volumen de aire: V

Velocidad del agua o del fluido: v

Velocidad del agua en el tanque: v_T

Momento angular de inercia total (bomba, motor y agua que pasa por la bomba, en función del radio y la masa): WR^2

Posición: x

Carga piezométrica: y

Cota de elevación, tirante de agua, altura de tanques: Z

Coefficiente politrópico: α

Torque, par o momento angular, adimensional: β

Intervalo de integración: Δt

Incremento en la posición: Δx

Peso específico del agua: γ

Promedio de la rugosidad de la tubería: ε

Eficiencia: η

Ángulo en grados: θ

Viscosidad del fluido: ϑ

Densidad del agua: ρ

Fase de la oscilación: ϕ

Frecuencia de la oscilación, velocidad angular de la bomba: ω

Texto en cursivas: definición de variables y nombres de los botones del software

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

