



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Manual de uso del programa
TRANS versión *Docencia* para la
simulación de transitorios
hidráulicos en conductos a
presión**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Heriberto Luna Castro

DIRECTORA DE TESIS

M. en C. Libia Georgina Carmona



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Heriberto Luna Anaya y Rosa María Castro Gutiérrez, sin quienes no hubiera llegado hasta este momento de mi vida y que en mi formación académica y crecimiento como persona cumplieron un papel fundamental. Este logro no es solo mío sino también de ustedes.

A mi hermano Erick Alejandro Luna Castro (Le A.), que durante toda mi vida ha sido un gran compañero y que siempre creyó en mí.

A mis tíos Everardo, Aquiles, Amelia, Olga y Yola, cuya hospitalidad y gentileza me hizo sentir como en casa y a quienes les debo todo su apoyo.

A mis primos Yazmín, Edgar, Omar, Anthony e Ivonne, a quienes les agradezco su apoyo, las charlas y los buenos momentos.

A mis amigos Miguel, Francisco, Jovani y Karla por su compañerismo y respaldo dentro de la facultad.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme sus puertas y en especial a la M. en C. Libia Georgina Carmona Paredes quien tuvo la amabilidad y el tiempo de ser mucho más que mi directora de tesis, fue mi maestra y le agradezco todo el conocimiento que adquirí durante más de un año. Gracias por su contribución en el desarrollo de esta tesis.

Y finalmente, a mis sinodales, la M.I. Amalia Adriana Cafaggi Félix, el M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, el M.I. Eduardo Antonio Rodal Canales y el Ing. Marcos Trejo Hernández, por su tiempo en la revisión de esta tesis.

Índice General

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivo general del trabajo	2
1.3 Objetivos específicos del trabajo	2
1.4 Estructura de la tesis	3
Capítulo 2: Conceptos básicos.....	4
2.1 Descripción de un flujo transitorio.....	4
2.2 Modelo para una tubería rígida y flujo incompresible	7
2.2.1 Ecuación de continuidad.....	7
2.2.2 Ecuación dinámica.....	9
2.3 Modelo para una tubería elástica y flujo compresible	13
2.3.1 Celeridad.....	13
2.3.2 Ecuación de continuidad.....	14
2.3.3 Ecuación dinámica.....	15
2.4 Método de las características	16
Capítulo 3: Dispositivos de control de transitorios	23
3.1 Torre de oscilación.....	24
3.2 Tanque unidireccional.....	30
3.3 Cámara de aire	34
3.4 Válvula de admisión y expulsión de aire	39
Capítulo 4: Descripción de la interfaz del programa TRANS versión docencia.....	42
4.1 Propósito de su uso y descripción general	42
4.2 Archivo de datos	43
4.2.1. Tramos	46
4.2.2 Fronteras y maniobras en los extremos	51
4.2.3 Elementos entre tramos	60
4.2.4 Maniobras entre tramos	66
4.2.5 Arreglo de la conducción.....	68

4.3 Sistema de simulación de transitorios.....	69
4.3.1 Archivo de resultados _H.....	72
4.3.2 Archivo de resultados _HEX.....	72
4.3.3 Archivo de resultados _Q.....	72
4.3.4 Archivo de resultados _RPM_Z.....	72
Capítulo 5: Uso de TRANS para la ayuda en el diseño de dispositivos de control de transitorios	73
5.1 Ejemplo de un sistema con torre de oscilación.....	73
5.2 Ejemplo de un sistema con un tanque unidireccional.....	93
5.3 Ejemplo de un sistema con una cámara de aire	103
5.4 Ejemplo de un sistema con una válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) .	112
Capítulo 6: Comentarios y conclusiones	128
Bibliografía.....	130

Capítulo 1: Introducción

1.1 Descripción del problema

Entre los sistemas hidráulicos con tuberías a presión están aquellos cuyo propósito es transportar agua con ayuda de diversas estructuras como lo son: equipos de bombeo, válvulas y dispositivos o estructuras para el control de transitorios (torres de oscilación, cámaras de aire, tanques unidireccionales y válvulas de admisión y expulsión de aire).

La importancia de un sistema hidráulico con tuberías a presión radica principalmente en satisfacer las necesidades de una población, ya sea para contar con agua potable o para desalojar aguas residuales o pluviales, por lo que estos sistemas deberán transportar el agua desde una fuente de captación hacia un lugar de entrega de manera segura y adecuada.

Algunos de estos sistemas pueden operar a gravedad, los cuales aprovechan una mayor elevación sobre el nivel del mar del lugar de captación para transportar el agua hacia el lugar de entrega con menor elevación sin necesidad de algún dispositivo que bombee el agua a no ser que se necesite alguno para compensar la pérdida debida a la fuerza de fricción.

Otros sistemas hidráulicos a presión son los que operan necesariamente con equipos de bombeo, los cuales deben vencer la diferencia de elevación que hay entre los puntos de captación y de entrega. Estos sistemas transportan el agua desde un punto de menor elevación hasta otro con mayor elevación.

En la operación de los sistemas hidráulicos con tuberías a presión es común que se presenten paros en los equipos de bombeo, cierres de válvulas o también puestas en marcha de los mismos sistemas. Estas maniobras comunes provocarán lo que se conoce como *transitorio hidráulico*, concepto que se explicará a detalle más adelante en el capítulo 2.

Los transitorios hidráulicos pueden ocasionar sobrepresiones y depresiones en la tubería, así como sobrevelocidades en los equipos de bombeo. Todo esto puede llevar a problemas graves como rupturas y colapsos de la tubería o también fallas en las bombas, por lo que el análisis de los transitorios es de suma importancia al momento de diseñar estos sistemas.

Para el estudio de los transitorios hidráulicos se han elaborado varios modelos matemáticos, como lo son la ecuación de Joukowsky o las ecuaciones de Allievi, los cuales son herramientas que ayudan a obtener información del fenómeno transitorio. Sin embargo, el modelo que se explicará a fondo en el presente trabajo se basa en resolver las ecuaciones de golpe de ariete con el método de las características.

Este método permite modelar varios tipos de elementos y estructuras presentes a lo largo de la tubería como cambios de tramo, tanques de carga constante, dispositivos contra transitorios, válvulas, bombas, entre otros, lo cual es una ventaja que este método tiene por sobre otros modelos de análisis.

Pese a esta ventaja, los cálculos numéricos con el método llegan a complicarse conforme a tantas estructuras se tengan en la tubería. Por lo que empieza a ser necesario el uso de herramientas como la computadora.

Es debido a esta necesidad que surgió el *programa de simulación de transitorios hidráulicos en conductos a presión (TRANS)*, el cual es un software desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el Dr. Rafael Carmona Paredes y la M. en C. Libia Georgina Carmona Paredes, en conjunto con el M. en C. Gabriel Castillo Hernández.

Con dicho programa pueden analizarse los transitorios en sistemas hidráulicos con tuberías a presión a través de cálculos basados en el método de las características. Esto permite al usuario proponer dispositivos para limitar las presiones que se pudieran presentar en el interior de las tuberías y conocer la influencia estos en el sistema, para así, poder determinar las dimensiones de tales dispositivos.

El programa ha ido cambiando desde su concepción y ha sido mejorado conforme a las necesidades de cada sistema hidráulico, a lo largo de años de experiencia en diferentes sistemas.

Actualmente se tienen dos versiones del programa, la primera es la versión *sistemas de bombeo*, la cual contempla más dispositivos de control de transitorio, más estructuras y maniobras. Y, por otra parte, está la versión *docencia*, cuyo objetivo es principalmente que el estudiante pueda iniciarse en el uso del programa para el análisis de transitorios en conductos a presión. El presente trabajo se refiere al programa en su versión *docencia*.

1.2 Objetivo general del trabajo

El objetivo general del trabajo es elaborar un manual que explique a los estudiantes interesados el uso del programa TRANS versión *docencia* para facilitar el modelado de sistemas hidráulicos con tuberías a presión y sus dispositivos para el control de transitorios.

1.3 Objetivos específicos del trabajo

Los objetivos específicos son:

- Presentar al lector los principios básicos en los que TRANS se basa, esto con el fin de que se tenga una visión amplia del alcance del programa.
- Explicar los diferentes dispositivos de control de transitorios que se tienen en el programa en su versión *docencia*.
- Explicar el uso del programa, así como su interfaz y las partes que la conforman.
- Analizar ejemplos de sistemas hidráulicos a presión que sean sencillos para mostrar de manera práctica el uso del programa.

1.4 Estructura de la tesis

El trabajo de la tesis se desarrolla en seis capítulos. En este primero se explican los alcances que tiene el trabajo, sus objetivos y se da una introducción a lo que consiste el programa TRANS.

En el segundo capítulo se abordan temas básicos como lo son los modelos de columna rígida y elástica con sus ecuaciones, asimismo, se presenta el método de las características. Todo esto con el propósito de entender la información que se debe ingresar al programa TRANS, así como el saber interpretar los resultados que este le brinda al usuario.

En el tercer capítulo se presentan los diversos tipos de estructuras o dispositivos que controlan los efectos de un transitorio en la tubería, dichos dispositivos son los incluidos en la versión *docencia* del programa.

En el cuarto capítulo se explica la interfaz del programa TRANS y su manejo, también se ve la manera en cómo se representa un sistema hidráulico a presión en el programa.

El quinto capítulo complementa lo visto en el cuarto a través de ejemplos sencillos en donde se comparan los casos en los que el sistema hidráulico a presión cuenta o no con algún dispositivo de control de transitorio.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones y algunos comentarios respecto a la realización del trabajo de tesis.

Capítulo 2: Conceptos básicos

Con el fin de comprender la información que el programa TRANS requiere para analizar flujos transitorios y poder interpretar los resultados que este da, se requiere conocer los conceptos, métodos y ecuaciones con los que este trabaja.

2.1 Descripción de un flujo transitorio

Uno de los conceptos de los que se puede partir para comprender el fenómeno de los transitorios hidráulicos es el de *flujo*, el cual se define como el espacio en el cual se da el movimiento de un fluido.

A continuación, se presentan tres clasificaciones de tipos de flujos.

- **Flujo unidimensional:** el flujo puede describirse a través de una coordenada espacial.
- **Flujo permanente y no permanente:** cuando las características principales como el gasto y la presión no varían con el tiempo en un punto dado de la conducción, el flujo es permanente. En caso contrario, si estas varían, es no permanente. También es común que a estos flujos se les conozca con el nombre de estacionarios y no estacionarios, respectivamente.
- **Flujo uniforme y no uniforme:** cuando el vector de velocidad no cambia en cualquier punto del flujo para un instante de tiempo el flujo se considera uniforme, de lo contrario, es no uniforme.

Cabe señalar que las ecuaciones que se verán en este capítulo corresponden al flujo en una tubería completamente llena de fluido, a la que se denomina tubería a presión, en donde se considera un valor medio V de la velocidad.

El diseño de un sistema hidráulico a presión no solo debe contemplar las condiciones de un flujo permanente, sino que también se deben prever los efectos que pueda tener un transitorio en el sistema ya que estos pueden provocar cambios importantes en las propiedades del fluido, la de mayor importancia en este caso es la presión.

Una definición importante a considerar en el estudio de un transitorio es la de fluido compresible e incompresible, si los cambios en la densidad del flujo no varían o lo hacen muy poco de una sección a otra en un conducto, este es incompresible. Por lo contrario, se considera compresible cuando la densidad no es constante.

Para estudiar un flujo transitorio, las ecuaciones derivadas de las condiciones de flujo permanente no son las adecuadas, por lo que se recurre a modelos que toman en cuenta el flujo no permanente. Para entender dichos modelos se debe definir primeramente lo que es un flujo transitorio.

Como se mencionó anteriormente, un flujo al cual se le denomina permanente es aquel cuyas variables de gasto y presión son constantes en un punto o sección dada con respecto al tiempo. Por otro lado, el flujo se considera como no permanente cuando las variables de gasto y presión cambian con el tiempo en una sección determinada.

Un caso particular de un flujo no permanente es el flujo transitorio, el cual se define como un estado intermedio entre dos estados de flujo permanente, es decir, que al ocurrir alguna maniobra en el sistema, el gasto y la presión pasarán de ser constantes en flujo permanente a variar con respecto al tiempo hasta que estos valores lleguen finalmente a otro estado de flujo permanente y sean constantes de nuevo.

Para ejemplificar mejor lo anterior, supóngase un sistema de bombeo que está operando a flujo permanente, es decir gasto y presión constantes, cuando repentinamente la energía eléctrica con la que operan las bombas se interrumpe. A partir de ese momento, las bombas dejarán de operar y el gasto a lo largo de la tubería, así como la presión cambiarán con el tiempo, hasta que finalmente estos valores lleguen a un valor constante de nuevo en donde el sistema estará en reposo.

Es común que en los sistemas hidráulicos a presión se generen transitorios, ya sea por el paro de emergencia o programado de un equipo de bombeo, la puesta en marcha del sistema o también por el cierre y apertura de válvulas.

Las variables que adquieren importancia al momento de estudiar un transitorio son la presión y la velocidad, ya que estas son las que pueden variar de una manera importante, dependiendo del tipo de transitorio.

Debido a lo anterior, la carga piezométrica se debe revisar al momento en que ocurre un transitorio, ya que esta nos brinda información sobre las sobrepresiones o depresiones que se puedan presentar en el conducto.

Existe una clasificación de los flujos transitorios de acuerdo a la manera en que estos ocurren en un conducto a presión, es decir a la rapidez con la que las variables del flujo cambian.

Los flujos transitorios se clasifican en:

Transitorios lentos: son aquellos en los que se da un intercambio de masa entre dos depósitos con niveles de energía diferentes, como lo muestra la figura 2.1. Son también llamados *transitorios de oscilación de masa*.

En este tipo de transitorios la variación de la presión en la tubería no es muy grande por lo que no se toman en cuenta las propiedades elásticas del fluido ni de la tubería.

Debido a lo anterior, el fluido se puede considerar como incompresible y la tubería como rígida.

Este fenómeno se puede analizar con el modelo de la columna rígida, el cual se explicará más adelante.

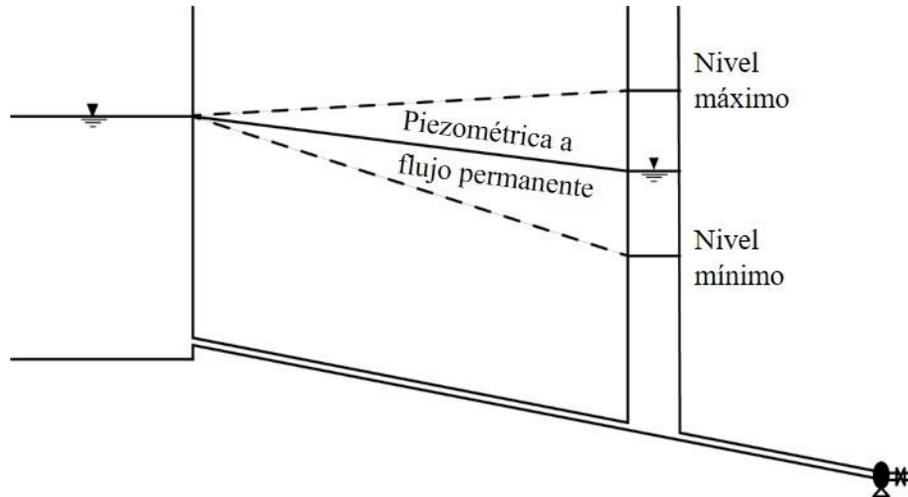


Figura 2.1: Fenómeno de oscilación de masa.

Transitorios rápidos: son aquellos en los que el gasto y la presión cambian de manera muy rápida debido a una maniobra brusca como el cierre o apertura de una válvula o el paro de emergencia de un equipo de bombeo. Al darse dicha maniobra, la velocidad del flujo cambia de una manera significativa provocando cambios importantes en las propiedades elásticas del fluido y de la tubería. Son también conocidos como *transitorios de golpe de ariete*.

Debido a lo anterior, en el estudio de estos fenómenos se considera la compresibilidad del fluido, así como las características elásticas del material del cual está hecha la tubería.

De no tenerse en cuenta los efectos de un flujo transitorio en un sistema, se pueden presentar los siguientes problemas:

- **Falla o ruptura de la tubería:** esto se presenta cuando la sobrepresión generada a partir de un transitorio más la que ya había en la operación del sistema, rebasan la resistencia de la tubería.
- **Colapso de la tubería:** se puede presentar cuando la presión en el interior de la tubería baja de tal manera que es menor que la que hay en el exterior.
- **Sobrevelocidad en los equipos de bombeo:** en caso de que se invierta el flujo y entre al equipo de bombeo, éste puede producir que las bombas giren a una mayor velocidad en sentido contrario de la especificada por el fabricante, por lo cual es factible que este se dañe.

- **Separación de columna líquida:** sucede debido a la baja presión que puede presentarse en la tubería, esta hace que el agua alcance la presión de vapor, por lo que cambia de fase líquida a gaseosa. Esto generará una discontinuidad en la columna de agua provocada por una burbuja que concentra, en la zona de baja presión, el aire disuelto en el agua más el vapor de agua que pudo haberse producido. Si una onda de alta presión incide en dicha discontinuidad puede presentarse una ruptura en la tubería por sobrepresión.

2.2 Modelo para una tubería rígida y flujo incompresible

También llamado modelo de la columna rígida o modelo de oscilación de masa es un modelo con el que se analizan los transitorios lentos.

En el intercambio de masa entre dos depósitos de distintos niveles de energía no hay grandes cambios de presión en la conducción, por lo que se supone un fluido incompresible y no se consideran las características elásticas del conducto ni del fluido.

Este modelo se basa en las ecuaciones de continuidad y dinámica, las cuales serán presentadas a continuación.

2.2.1 Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad parte del principio de conservación de la masa, el cual establece que en un volumen de control como el mostrado en la figura 2.2, su masa en la unidad de tiempo no cambia de una sección a otra.

En dicha figura se muestran dos secciones de área transversal A por las cuales pasa una cierta masa m . La dirección del flujo contenido en el volumen de control es una coordenada curvilínea s .

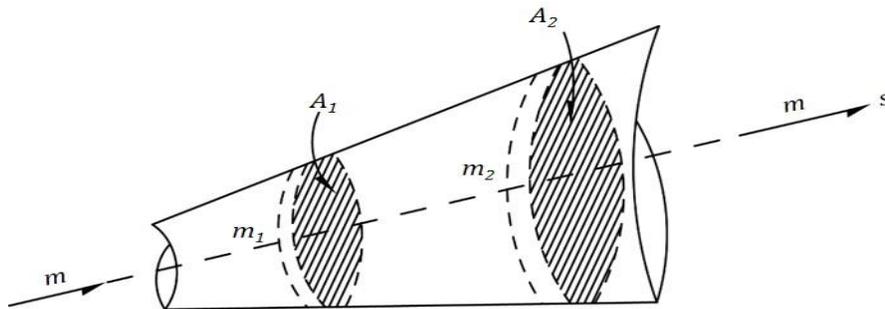


Figura 2.2: Volumen de control delimitado por una frontera o superficie de control.

Del principio de conservación de la masa se tiene lo siguiente:

$$\frac{m_1}{t} = \frac{m_2}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

m_1, m_2 son las masas que atraviesan cada sección, en kg.

t es el tiempo, en s.

Como la masa queda definida por el siguiente producto:

$$m = \mathcal{V}\rho \quad (2.2)$$

Donde:

\mathcal{V} es el volumen, en m^3 .

ρ es la densidad, en kg/m^3 .

Entonces, la ecuación (2.1) queda como:

$$\frac{\rho_1 \mathcal{V}_1}{t} = \frac{\rho_2 \mathcal{V}_2}{t} \quad (2.3)$$

El gasto se define como:

$$Q = \frac{\mathcal{V}}{t} \quad (2.4)$$

Considerando un fluido incompresible, en el que la densidad es la misma en cada sección de la conducción $\rho_1 = \rho_2$ y tratándose de un flujo no estacionario en el que la velocidad está en función del tiempo y la posición, y el área solo depende de esta última (por tratarse de una tubería rígida), entonces la ecuación (2.3) queda:

$$\begin{aligned} \rho V_1(s, t) A_1(s) &= \rho V_2(s, t) A_2(s) \\ Q(s, t) = V_1(s, t) A_1(s) &= V_2(s, t) A_2(s) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde:

Q es el gasto, en m^3/s .

V es la velocidad media del fluido, en m/s .

A es el área de la sección, en m^2 .

2.2.2 Ecuación dinámica

Considerando el elemento de fluido mostrado en la figura 2.3, con un diámetro D , que está inclinado un ángulo θ con respecto a la horizontal y en donde se tienen dos secciones (1 y 2) separadas una distancia Δs .

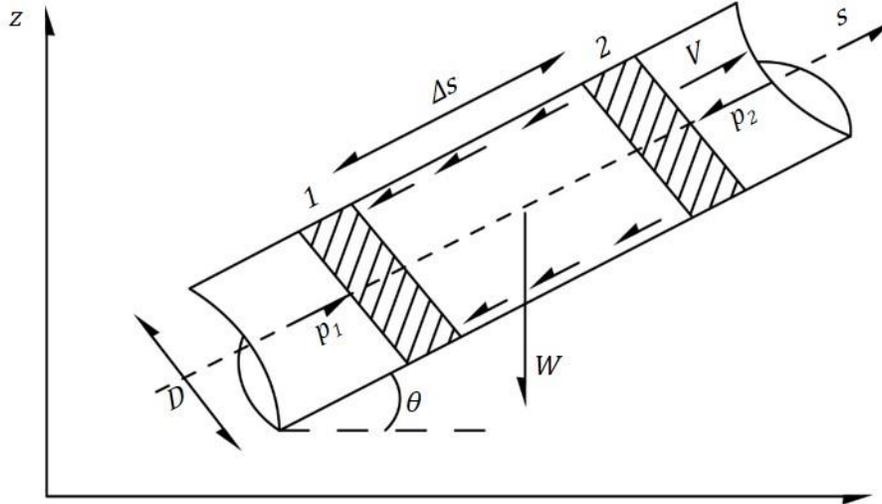


Figura 2.3: Elemento de fluido.

Las fuerzas actuantes en el sistema, en la dirección del flujo, son la componente del peso W del fluido en dirección s , las fuerzas de presión ejercidas p_1 y p_2 , y el esfuerzo cortante sobre la superficie del fluido τ .

Si se aplica la segunda ley de Newton:

$$\sum F_i = ma \quad (2.6)$$

Donde:

m es la masa, en kg.

a es la aceleración, en m/s^2 .

F_i son las fuerzas que actúan en el sistema en la dirección del flujo, en N.

Se tendrá lo siguiente:

$$(p_1 - p_2)A - \tau\pi D\Delta s - \rho\Delta sAg \sin \theta = \rho\Delta sA \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

Dividiendo la ecuación (2.7) por el peso del fluido contenido en las secciones 1 y 2:

$$\frac{(p_1 - p_2)}{\Delta s\rho g} - \frac{\tau\pi D}{\rho Ag} - \sin \theta = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.8)$$

Donde:

p_1, p_2 son las presiones en la sección 1 y 2 respectivamente, en N/m^2 .

A es el área transversal de la sección, en m^2 .

D es el diámetro del conducto, en m.

Δs es la distancia a la que están separadas las secciones 1 y 2, en m.

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

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

τ es el esfuerzo tangencial, en $kg/m s^2$ dado por:

$$\tau = \rho f \frac{V|V|}{8} \quad (2.9)$$

Si se hacen las siguientes aproximaciones cuando la distancia entre las secciones 1 y 2 tiende a cero:

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta s} = \frac{dz}{ds} = \sin \theta \quad (2.10)$$

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{(p_1 - p_2)}{\Delta s} = \frac{dp}{ds} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.8), desarrollándose el término del área y el del esfuerzo tangencial, además de considerarse las posiciones de p_1 y p_2 en el tubo, queda como:

$$-\frac{1}{\gamma} \frac{dp}{ds} - \frac{fV|V|}{2gD} - \frac{dz}{ds} = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.12)$$

Como en un flujo no permanente, la velocidad que tiene el fluido cambia con el tiempo y la posición, la derivada de la velocidad con respecto al tiempo se puede escribir como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{dV^2}{ds} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, la ecuación (2.12) se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{fV|V|}{2gD} \quad (2.14)$$

Si se considera la carga piezométrica h como la suma de la carga de posición más la de presión, la ecuación (2.14) puede escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{fV|V|}{2gD} \quad (2.15)$$

En la figura 2.4 se muestra un sistema formado por un depósito de área constante (torre de oscilación), el cual es la sección 1 y un tanque de entrega, el cual es la sección 2, unidos por una conducción de longitud l .

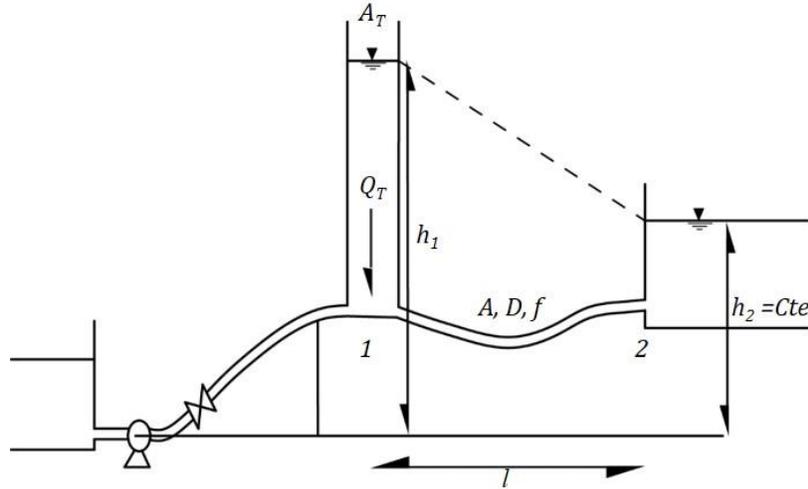


Figura 2.4: Sistema con una torre de oscilación.

Tomando la ecuación (2.15) e integrando en el intervalo de 0 a l resulta lo siguiente, para una tubería de diámetro constante:

$$\int_0^l \frac{\partial}{\partial s} \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) ds = -\frac{1}{g} \int_0^l \frac{\partial V}{\partial t} ds - \frac{f}{2gD} \int_0^l V^2 ds$$

$$h_1 - h_2 - \frac{fl}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{l}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.16 \text{ a})$$

Si se deja la ecuación (2.16 a) en términos del gasto y se acomodan términos, queda:

$$\frac{l}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fl}{2gD} \frac{Q^2}{A^2} - (h_1 - h_2) = 0 \quad (2.16 \text{ b})$$

La variación de la carga piezométrica en la torre depende del gasto Q_T que esta entrega o recibe en el momento en que se presenta el transitorio y del área que tiene A_T .

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-Q_T}{A_T} \quad (2.17)$$

Si el gasto que entra o sale de la torre se supone igual al de la tubería, la ecuación (2.17) se puede expresar en términos del gasto que hay en la tubería:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{-Q}{A_T} \quad (2.18)$$

El sistema de ecuaciones diferenciales que forma la ecuación (2.16 b) y la (2.18) es lo que se usará para resolver el fenómeno de oscilación de masa. Este sistema no tiene una solución analítica, por lo que su solución se puede obtener por medio de un método numérico.

Usando la definición de derivada como un límite que tiende a cero:

$$\frac{dx}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Aplicando la definición anterior a las ecuaciones (2.16 b) y (2.18) y considerando la carga h_2 constante debido a que el área del tanque es muy grande, se llega a lo siguiente:

$$\frac{l}{gA} \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t)}{\Delta t} + \frac{fl}{2gD} \frac{Q(t)}{A^2} |Q(t)| - [h_1(t) - h_2] = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{h_1(t + \Delta t) - h_1(t)}{\Delta t} = \frac{-Q}{A_T} \quad (2.21)$$

Para simplificar las ecuaciones anteriores se definen como constantes a los siguientes términos:

$$K_f = \frac{fl}{2gDA^2} \quad (2.22)$$

$$K_l = \frac{l}{gA} \quad (2.23)$$

Reescribiendo las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$Q(t + \Delta t) = Q(t) - \frac{\Delta t}{K_l} \{K_f Q(t) |Q(t)| - [h_1(t) - h_2]\} \quad (2.24)$$

$$h_1(t + \Delta t) = h_1(t) - \frac{\Delta t}{A_T} Q(t + \Delta t) \quad (2.25)$$

Donde:

$Q(t + \Delta t)$ es el gasto en el tiempo $(t + \Delta t)$, en m^3/s .

$Q(t)$ es el gasto en el tiempo (t) , en m^3/s .

$h_1(t + \Delta t)$ es la carga de presión en el tiempo $(t + \Delta t)$ en la torre de oscilación, en m.

$h_1(t)$ es la carga de presión en el tiempo (t) en la torre de oscilación, en m.

h_2	es la carga de presión en el tanque de entrega, en m.
Δt	es el incremento de tiempo en el que se hace el análisis, en s.
A_T	es el área transversal de la torre de oscilación, en m ² .
f	es el factor de fricción.
l	es la distancia entre ambos depósitos, en m.
A	es el área transversal de la tubería, en m ² .
D	es el diámetro de la conducción, en m.
g	es la aceleración de la gravedad, en m/s ² .

Las ecuaciones (2.24) y (2.25) son las que se usan en el análisis de un transitorio lento o fenómeno de oscilación de masa.

El análisis anterior se hizo para el tramo comprendido entre las secciones 1 y 2, sin embargo, en el tramo aguas arriba de la sección 1 se presenta un transitorio rápido, el cual debe ser analizado por medio de las ecuaciones de golpe de ariete.

2.3 Modelo para una tubería elástica y flujo compresible

Este modelo es el adecuado para analizar un transitorio rápido o golpe de ariete ya que considera la elasticidad de la tubería y la compresibilidad del fluido. En este caso, el cambio de la presión en el interior de la tubería se transmite del sitio en donde se originó el transitorio hacia ambos extremos del conducto a través de una onda de presión que viaja con una velocidad igual con la que se propaga el sonido en ese medio, a esta se le llama *celeridad*.

2.3.1 Celeridad

Un término importante de conocer en un transitorio rápido es el de la celeridad, la cual se define como la velocidad a la cual se propagan las ondas de presión a lo largo de la tubería.

La celeridad depende de las características que tiene el fluido, así como de las que tiene el conducto. Esto se puede representar por medio de la siguiente expresión:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE_t} \right)}} \quad (2.26)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido, en kg/m³.

E_v es el módulo de compresibilidad volumétrico del agua, en Pa.

E_t es el módulo de elasticidad del material de la tubería, en Pa.

- D es el diámetro de la tubería, en m.
- e es el espesor de la pared de la tubería, en m.
- a es la celeridad, en m/s.

El valor de E_v depende de la temperatura del agua y el de E_t depende del material del que esté hecha la tubería.

2.3.2 Ecuación de continuidad

Para el caso en el que se considera la compresibilidad del fluido y la elasticidad de la tubería, la ecuación de continuidad es más compleja que cuando se trata de un fluido incompresible en tubería rígida.

En las figuras 2.5 y 2.6 se representan los cambios en la densidad ρ , la velocidad V y el área A a través del tiempo y la posición.

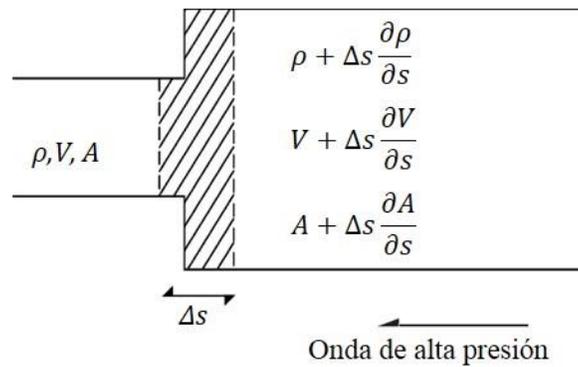


Figura 2.5: Cambio de masa respecto a la posición.

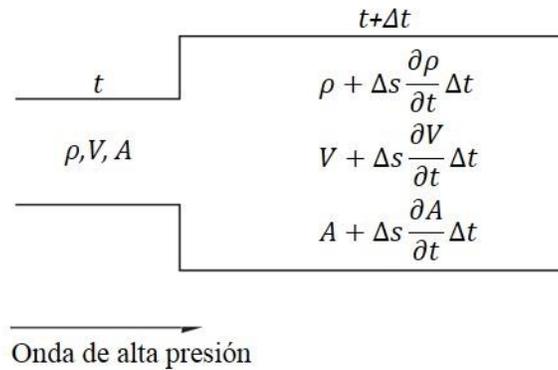


Figura 2.6: Cambio de masa respecto al tiempo.

A partir de un balance de masa cuyo desarrollo no se hará en este trabajo, pero se puede consultar en la Ref. 7, se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} + \frac{\rho}{A} \cdot \frac{\partial A}{\partial p} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \rho \frac{\partial V}{\partial s} = 0 \quad (2.27)$$

2.3.3 Ecuación dinámica

Para el caso de una tubería elástica y un fluido compresible, considerando que el cambio de la velocidad con respecto al tiempo es mucho mayor que el cambio con respecto a la posición:

$$\left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \gg \left| V \frac{\partial V}{\partial s} \right| \quad (2.28)$$

La ecuación dinámica (2.14) tendrá la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) &= -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{fV|V|}{2gD} \\ \frac{\partial h}{\partial s} &= -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{fV|V|}{2gD} \end{aligned} \quad (2.29)$$

A partir de las ecuaciones (2.27) y (2.29) se puede dar solución al análisis de un transitorio rápido, sin embargo, hace falta incluir las ecuaciones constitutivas de la compresibilidad fluido y de la elasticidad del conducto. Dichas ecuaciones son las siguientes:

Fluido:

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{\rho_0}{K} \quad (2.30)$$

Donde:

ρ_0 es la densidad de referencia, en kg/m^3 .

K es el módulo de compresibilidad volumétrica del fluido, en kg/m^2 , como en este caso se trata de agua, entonces será igual a E_V .

Tubería

$$\frac{\partial R}{\partial p} = C \quad (2.31)$$

Donde:

R es el radio interior, en m.

C es una constante que depende del radio interior del conducto, el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad.

Con las siguientes hipótesis:

$$\left| \frac{\Delta D}{D} \right| \ll 1 \quad (2.32)$$

$$\left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right| \ll 1 \quad (2.33)$$

$$\left| \frac{\partial p}{\partial t} \right| \gg \left| V \frac{\partial p}{\partial s} \right| \quad (2.34)$$

Desarrollando el sistema de ecuaciones compuesto por (2.27), (2.29), (2.30), (2.31) y considerando las hipótesis (2.32), (2.33) y (2.34), quedan las siguientes expresiones en términos del gasto:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.36)$$

En un transitorio la carga de velocidad es muy pequeña en comparación a la carga de presión, por lo que las cargas piezométrica h y total H tienen valores muy cercanos.

Donde:

Q es el gasto, en m^3/s .

H es la carga total, en este caso se considera igual a la piezométrica h , en m.

a es la celeridad, en m/s .

D es el diámetro del conducto, en m.

f es el coeficiente de fricción.

A es el área transversal del conducto, en m^2 .

t es el tiempo, en s.

s es la coordenada espacial a lo largo del conducto, en m.

g es la gravedad, en m/s^2 .

Las ecuaciones (2.35) y (2.36) forman el modelo para resolver transitorios rápidos, sin embargo estas ecuaciones también sirven para resolver un transitorio lento, para el cual se tendría que considerar el caso particular de una tubería rígida y fluido incompresible. Este sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas puede resolverse con el método de las características.

2.4 Método de las características

El análisis de un transitorio rápido o fenómeno de golpe de ariete se hace por medio de la solución numérica de un sistema de ecuaciones diferenciales cuasi-lineales de tipo hiperbólico formado por las ecuaciones de continuidad (2.35) y dinámica (2.36).

Este sistema no tiene una solución analítica, por lo que se procederá a resolverlo por medio del método de las características. Este método es posible de aplicar debido a que el sistema es hiperbólico (Ref.5).

El método de las características consiste en que a través de las ecuaciones (2.37 a) y (2.37 b), el sistema de ecuaciones (2.35) y (2.36) puede escribirse como un sistema de dos ecuaciones en derivadas totales en el tiempo con dos incógnitas, ecuaciones (2.38) y (2.39).

$$\frac{ds}{dt} = a \quad (2.37 \text{ a})$$

$$\frac{ds}{dt} = -a \quad (2.37 \text{ b})$$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (2.39)$$

Si se definen las constantes C_a y C_f como sigue:

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (2.40)$$

$$C_f = \frac{f}{2DA} \quad (2.41)$$

Y además se hacen las siguientes consideraciones:

$$\frac{dQ}{dt} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2.42)$$

$$\frac{dH}{dt} \approx \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2.43)$$

Las ecuaciones (2.38) y (2.39), aproximando las derivadas por incrementos y sustituyendo las ecuaciones (2.42) y (2.43), se pueden escribir de la siguiente manera:

Para:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = a$$

$$\Delta Q + C_a \Delta H + C_f \Delta t Q |Q| = 0 \quad (2.44)$$

Para:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = -a$$

$$\Delta Q - C_a \Delta H + C_f \Delta t Q |Q| = 0 \quad (2.45)$$

Para ver el método de una manera gráfica, se explicará la figura 2.7.

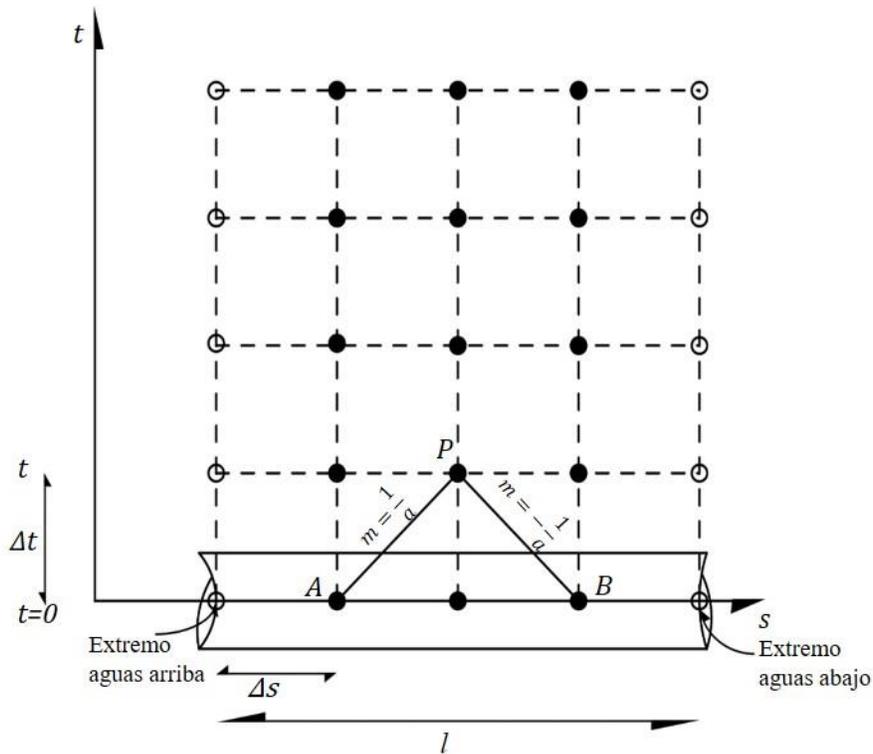


Figura 2.7: Método de las características visto de manera gráfica.

En la figura 2.7 se tiene un conducto dividido en n tramos de longitud Δs , este conducto está referenciado a los ejes de posición s y de tiempo t .

En la conducción se puede ver que para conocer los valores de carga y gasto de P en un tiempo (t) , se deben conocer los valores carga y gasto de A y B en $(t - \Delta t)$. Esto se hará para cada punto P en la zona del interior de la malla de cálculo.

Los puntos interiores de la tubería en $(t = 0)$ corresponden a las condiciones en flujo permanente.

Para hacer el cálculo con las expresiones (2.44) y (2.45) se debe cumplir en todo momento la condición:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \pm a \quad (2.46)$$

Esta condición se refiere a la velocidad de la onda de presión, la cual puede ir en dirección del flujo o contraria a este

Por lo que para hacer el cálculo del punto A en $(t - \Delta t)$ al punto P en (t) se debe hacer con la ecuación que representa a la recta con pendiente positiva, mientras que para hacer el cálculo de B en $(t - \Delta t)$ a P en (t) se usa la ecuación que representa a la recta de pendiente negativa. A las rectas mencionadas se les conoce como rectas características.

A partir de lo anterior, y de las siguientes consideraciones:

- Para ecuación (2.44):

$$\Delta Q = Q_P - Q_A \quad (2.47)$$

$$\Delta H = H_P - H_A \quad (2.48)$$

- Para ecuación (2.45):

$$\Delta Q = Q_P - Q_B \quad (2.49)$$

$$\Delta H = H_P - H_B \quad (2.50)$$

Las ecuaciones (2.44) y (2.45) se pueden escribir como:

$$(Q_P - Q_A) + C_a(H_P - H_A) + C_f \Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad (2.51)$$

$$(Q_P - Q_B) - C_a(H_P - H_B) + C_f \Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad (2.52)$$

Reagrupando términos:

$$Q_P + C_a H_P = Q_A + C_a H_A - C_f \Delta t Q_A |Q_A|$$

$$Q_P - C_a H_P = Q_B - C_a H_B - C_f \Delta t Q_B |Q_B|$$

Donde se definirá lo siguiente:

$$c_p = Q_A + C_a H_A - C_f \Delta t Q_A |Q_A| \quad (2.53)$$

$$c_n = Q_B - C_a H_B - C_f \Delta t Q_B |Q_B| \quad (2.54)$$

Las ecuaciones (2.44) y (2.45) finalmente quedan como:

$$Q_P + C_a H_P - c_p = 0 \quad (2.55)$$

$$Q_P - C_a H_P - c_n = 0 \quad (2.56)$$

Si se resuelve el sistema lineal formado por las ecuaciones (2.55) y (2.56) se encontrarán las siguientes soluciones:

$$H_P = \frac{c_p - c_n}{2C_a} \quad (2.57)$$

$$Q_P = \frac{c_p + c_n}{2} \quad (2.58)$$

Donde:

Q_P es el gasto en el punto $P(t)$, en m^3/s .

Q_A es el gasto en el punto $A(t - \Delta t)$, en m^3/s .

Q_B es el gasto en el punto $B(t - \Delta t)$, en m^3/s .

H_A es la carga en el punto $A(t - \Delta t)$, en m.

H_B es la carga en el punto $B(t - \Delta t)$, en m.

H_P es la carga en el punto $P(t)$, en m.

A los términos c_p y c_n se les conoce como parámetros de las características positiva y negativa, respectivamente.

Hasta ahora se han revisado únicamente los puntos P interiores en la malla de cálculo de la figura 2.8, sin embargo, en los puntos de las fronteras, si se trata del extremo aguas arriba, la característica positiva no existirá. Por otro lado, si se trata de la frontera aguas abajo de la conducción, no existirá la característica negativa.

Para ejemplificar mejor lo anterior, se presenta la figura 2.8, la cual es una malla de cálculo en donde los puntos interiores P se representan en negro y las fronteras como puntos blancos.

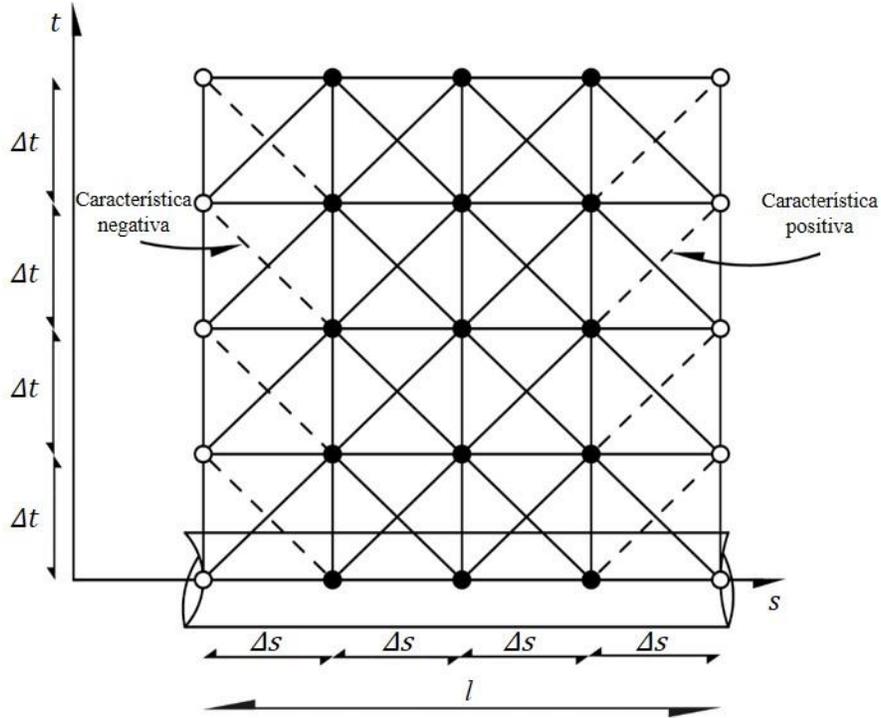


Figura 2.8: Malla de cálculo para método de las características.

Para los puntos en la frontera aguas arriba solo existirá la característica negativa, por otro lado, para los de la frontera aguas abajo solo será la positiva. Por lo tanto, las ecuaciones (2.57) y (2.58) no se pueden aplicar para estos puntos.

Para resolver el problema de los puntos en los extremos de la conducción se tiene que revisar las condiciones de frontera que se puedan tener, como lo son: un tanque de carga constante, un orificio, una válvula, un extremo ciego, una bomba, un cambio de tramo, una bifurcación o una turbina.

Uno de los elementos más comunes en alguna de las fronteras es un tanque de carga constante como el mostrado en la figura 2.9.

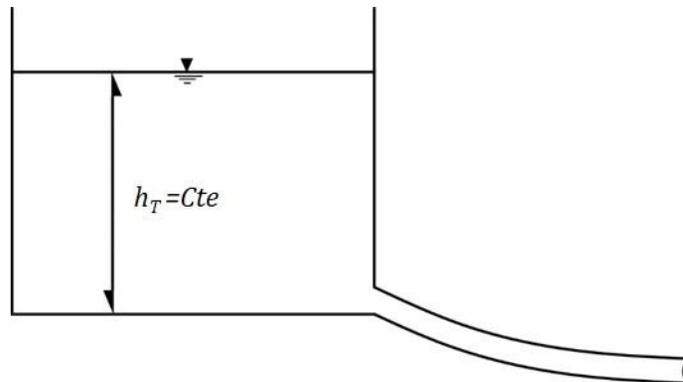


Figura 2.9: Tanque de carga constante en la frontera aguas arriba.

Si se tiene el tanque de carga constante en la frontera aguas arriba en el que no se considera la pérdida ni la velocidad de entrada del agua, entonces la carga en el punto P en (t) será igual a la de P en $(t - \Delta t)$ ya que en un tanque como el mencionado el nivel del agua permanece prácticamente constante, es decir:

$$H_P(t) = H_P(t - \Delta t) = H_T ; \text{ para todo } t \quad (2.59)$$

Por lo que el gasto en $P(t)$ en el extremo aguas arriba se calculará con la ecuación (2.56).

Otro caso es el de un extremo ciego en alguna de las fronteras de la conducción, en el cual el gasto es cero:

$$Q_P(t) = 0 \quad (2.60)$$

Si el extremo ciego está en la frontera aguas arriba, la carga $H_P(t)$ se calculará con la ecuación (2.56).

Si el extremo ciego está en la frontera aguas abajo, la carga $H_P(t)$ se calculará con la ecuación (2.55).

Como el objetivo del presente trabajo no es describir los modelos matemáticos de cada elemento que pueda haber en las fronteras de la conducción, sino el explicar el uso del programa TRANS, el cual contempla algunos de los elementos más comunes en las fronteras, se dejará al interés del lector el consultar la Ref. 5, la cual profundiza sobre cómo deben considerarse en el método de las características, los modelos matemáticos de dichos elementos como lo son: válvulas, orificios, bifurcaciones, derivaciones y cambios de tramo.

Capítulo 3: Dispositivos de control de transitorios

El propósito de este capítulo es dar una breve introducción acerca de los dispositivos de control de transitorios con los que la versión docencia del programa TRANS trabaja.

El diseño de un sistema hidráulico con tuberías a presión debe contemplar, además de las condiciones de flujo estacionario (flujo establecido o condiciones de operación), las condiciones de flujo transitorio debido a cierres o aperturas de válvulas y al paro o arranque de equipos de bombeo.

Como se vio en el capítulo anterior, un transitorio, sobretodo uno de tipo rápido, puede provocar problemas como una sobrepresión que sea mayor a la resistencia de la tubería, dando lugar a la ruptura de ésta o el caso contrario de una depresión que haga que la tubería colapse o se presente separación de la columna líquida.

Las sobrepresiones y depresiones en un sistema están representadas a través de lo que se conoce como línea de cargas máximas y línea de cargas mínimas, las cuales se definen como sigue.

Suponiendo que para un punto dado en la longitud de una tubería se analiza la carga de presión h , que en este caso es similar a la total H , al momento de darse un transitorio, esta irá variando con respecto al tiempo, alcanzando valores máximos y mínimos como se ve en la figura 3.1.

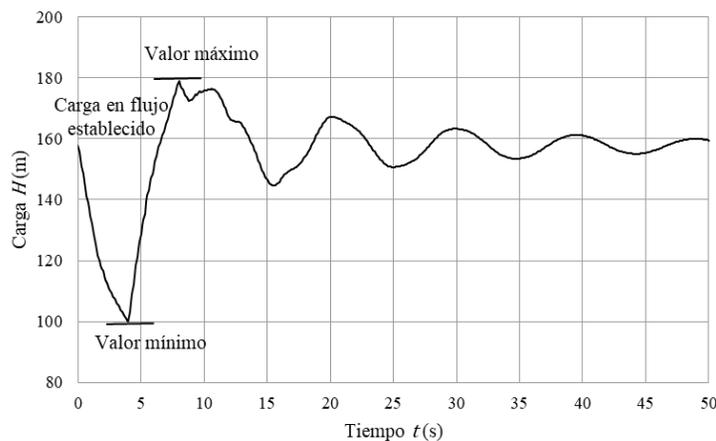


Figura 3.1: Variación de la carga H en función del tiempo t .

La gráfica de la figura 3.1 muestra la variación de la carga durante el transitorio para un punto específico de análisis en la longitud de la tubería.

Para cada punto que se considere a lo largo de la tubería se podrá obtener una gráfica como la de la figura 3.1, con sus respectivos valores máximo y mínimo.

Por lo tanto, la línea de cargas máximas estará constituida por los valores máximos de todos los puntos considerados a lo largo de la tubería, mientras que la línea de cargas mínimas estará constituida por los valores mínimos de dichos puntos. Por lo que las líneas de cargas mínimas y máximas estarán en función de la longitud de la tubería, al igual que la piezométrica de operación (a flujo establecido), esto se puede ver en las gráficas presentadas más adelante.

Las estructuras que se verán en el presente capítulo reciben el nombre de *dispositivos de control de transitorios* y se colocan en lugares específicos del sistema que sean adecuados para que los efectos de los transitorios en el conducto no sean graves y puedan llegar a dañarlo.

Muchas veces no basta con colocar un solo dispositivo de control de transitorios a lo largo del sistema, por lo que el número y el tipo de dispositivos dependerán de las condiciones topográficas del sitio y también del costo de las estructuras.

Algunos de los dispositivos más comunes que se usan en contra transitorios son explicados en lo sucesivo.

3.1 Torre de oscilación

Una torre o pozo de oscilación es un tanque cuya parte superior está abierta a la atmósfera y almacena un cierto volumen de agua en su interior. Esta estructura puede estar conectada por medio de una línea de conexión a la conducción principal o puede estar conectada directamente a esta última (conexión franca). Esta estructura ayuda a contrarrestar los efectos de un transitorio rápido.

La figura 3.2 muestra un esquema de la conexión de una torre, la cual no está operando, con la línea de conducción principal.

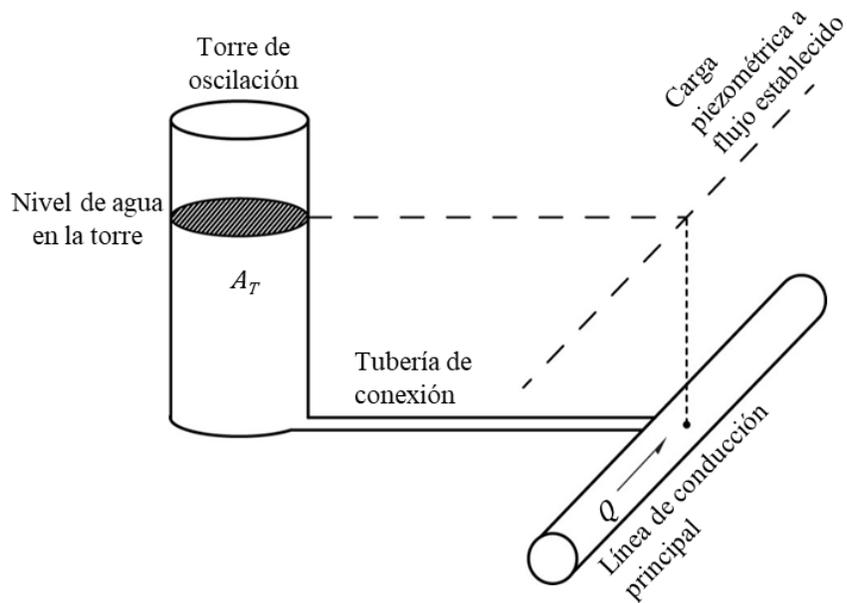


Figura 3.2: Esquema de la conexión de la torre de oscilación (sin operar) con la línea de conducción.

Cuando se considera que en la conexión de la torre con la conducción principal la pérdida de carga es despreciable, entonces la carga piezométrica que hay en ese punto de conexión es igual al nivel de agua que hay en la torre. Esto en flujo establecido.

Cuando se presenta una sobrepresión en el punto donde se tiene la conexión de la torre de oscilación con la conducción principal, debido a la diferencia de presiones que hay entre el nivel del agua de la torre y la piezométrica de la conducción principal, se establece un flujo de la segunda hacia la primera, esto evitará que la presión siga aumentando dentro de la línea de conducción principal.

Por otro lado, si se presenta una depresión en el punto de conexión, la presión será menor en la conducción que la debida al nivel de agua en la torre por lo que se dará un flujo de agua desde la torre hacia la línea de conducción, evitándose así que la presión siga disminuyendo.

Para el sistema presentado en la figura 3.3, cuyo gasto es de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, diámetro de tubería de 3.55 m , celeridad de 1000 m/s , una longitud de 2000 m y factor de fricción de 0.020 en donde se presenta una depresión debido al paro de un equipo de bombeo, la torre de oscilación colocada a 500 m de la planta de bombeo confina al transitorio rápido entre la planta de bombeo y la torre (tramo aguas arriba), esto último se puede ver en la figura 3.4.

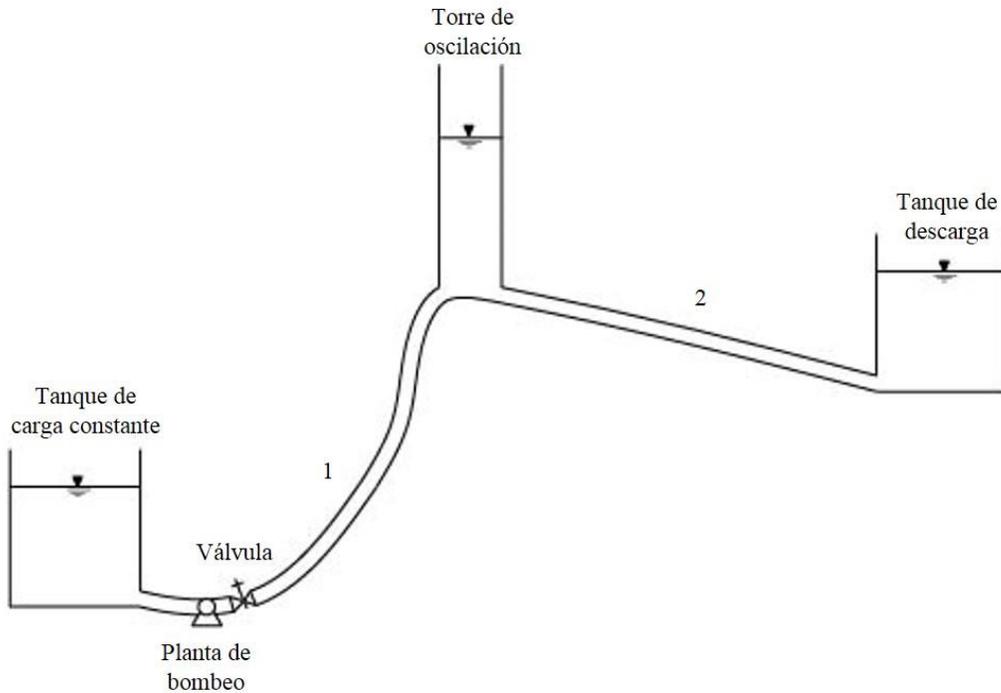


Figura 3.3: Sistema de bombeo con torre de oscilación.

El tramo desde la torre hacia el tanque de descarga (tramo 2) queda aislado de las perturbaciones rápidas o de golpe de ariete que se dan en el tramo 1. En el tramo 2 se presenta un fenómeno de oscilación de masa.

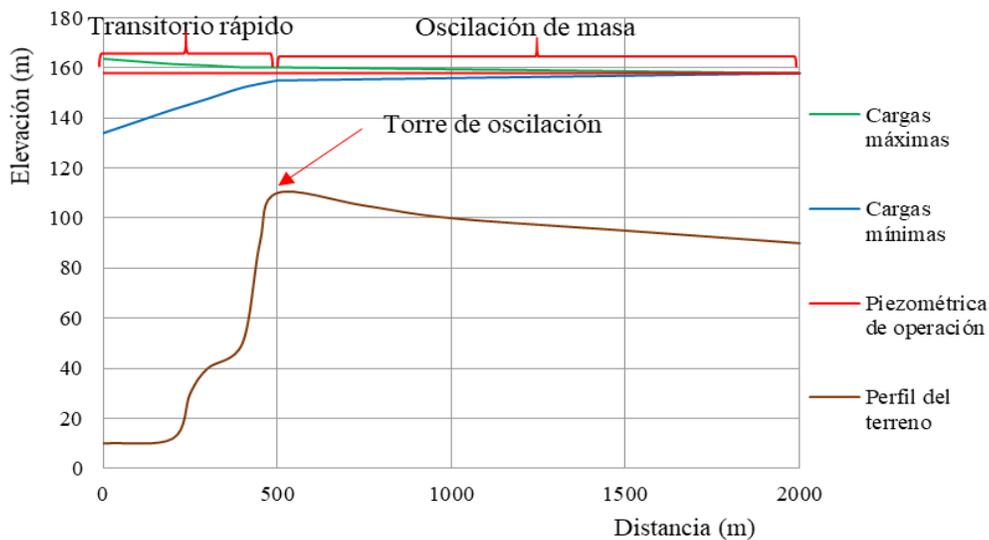


Figura 3.4: Cargas mínimas, máximas y de operación durante el transitorio.

Cuando se tiene un sistema operando a gravedad como el de la figura 3.5, cuyo diámetro de conducción de ambos tramos es de 3.55 m, celeridad de 1000 m/s, un coeficiente de fricción

de 0.020, por el cual pasa un gasto de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ y en donde se cierra rápidamente una válvula, se presenta una sobrepresión aguas arriba de la válvula.

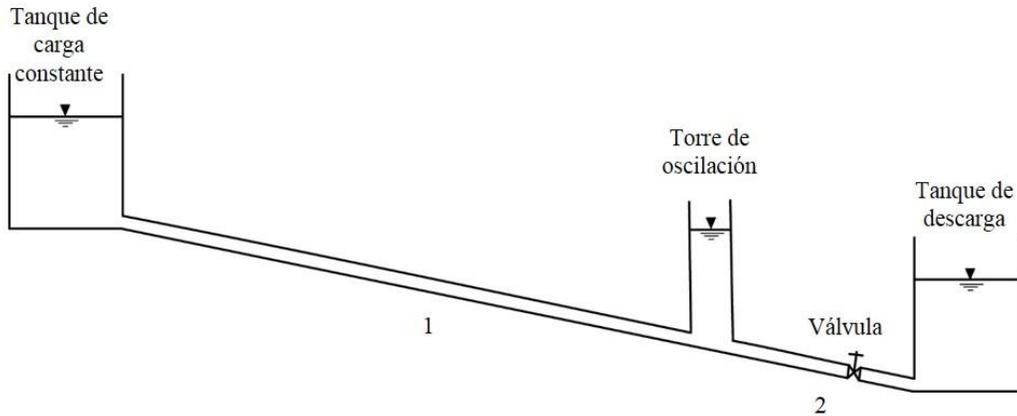


Figura 3.5: Sistema a gravedad.

La torre de oscilación que se coloca a 200 m aguas arriba de la válvula, confina el transitorio rápido entre esta y la válvula (tramo 2). Por otro lado, el tramo 1 queda sin perturbaciones importantes gracias a la torre, ver figura 3.6.

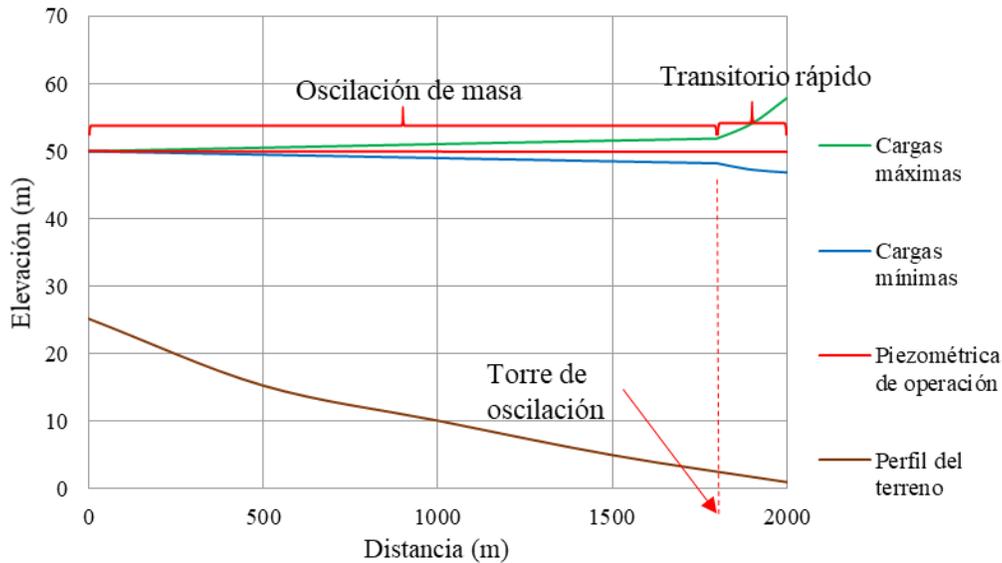


Figura 3.6: Cargas máximas, mínimas y de operación durante el transitorio.

Algunas de las ventajas que tiene una torre de oscilación frente a otros dispositivos de control de transitorios son las siguientes:

- No se requiere de algún tipo de mantenimiento mecánico.
- Se protege al tramo de la conducción fuera de la zona en la que se confina al transitorio rápido. Esto hace que en el tramo protegido no se necesite una tubería de

alta resistencia sino únicamente en donde se presenta el transitorio rápido. Por lo tanto, es recomendable colocar a la torre cerca de donde se origina el transitorio para que el tramo en donde se necesite la tubería de alta resistencia sea lo más pequeño posible.

Pese a las ventajas presentadas anteriormente, se debe tener en cuenta ciertos aspectos importantes a la hora de decidir colocar una torre de oscilación en un sistema de bombeo como:

- La torre no se debe vaciar ni debe desbordar. Para determinar esto, se deben revisar las cargas piezométricas máximas y mínimas que se presentan durante un transitorio.
- Se debe verificar las velocidades en reversa que deberán soportar los equipos de bombeo para los casos en los que las válvulas en las descargas de las bombas permitan un flujo de la línea de descarga hacia las bombas.

Una torre de oscilación tiene las siguientes desventajas:

- La topografía juega un papel muy importante por lo que las torres de oscilación se deben de poner en lugares de topografía elevada, lo cual en ocasiones no es posible.
- En ocasiones al tenerse que compensar la topografía con la altura de la torre, estas resultan muy costosas y difíciles de construir.
- Cuando hay torres de oscilación, estas pueden provocar una mayor velocidad de giro de las bombas en sentido inverso a cuando no las hay.
- En un sistema de bombeo, la presencia de una torre de oscilación puede hacer que se presenten presiones considerablemente altas entre el tramo entre esta y la planta de bombeo, sobre todo cuando las válvulas en la descarga de las bombas son check.

El modelo matemático que describe el comportamiento de una torre de oscilación en donde no se considera pérdida alguna en la entrada o salida de la torre se basa en las ecuaciones (3.1) a (3.4) de acuerdo a la figura 3.7.

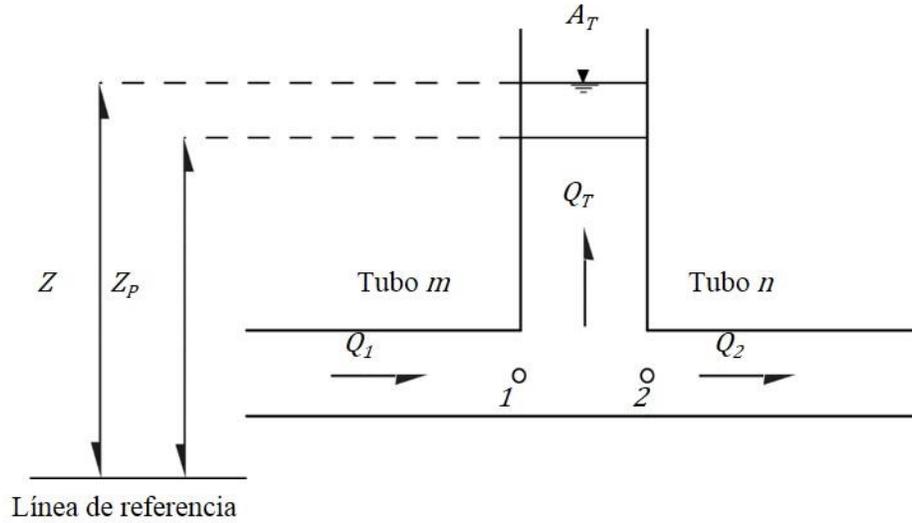


Figura 3.7: Torre de oscilación simple.

$$Q_{1P} = Q_{TP} + Q_{2P} \quad (3.1)$$

$$Q_{TP} = A_T \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \quad (3.2)$$

$$H_{1P} = Z_P \quad (3.3)$$

$$H_{2P} = Z_P \quad (3.4)$$

Para tener el mismo número de incógnitas (Q_{1P} , Q_{TP} , Q_{2P} , Z_P , H_{1P} , H_{2P}) que de ecuaciones, se hará uso de las ecuaciones del método de las características de acuerdo a la figura 3.7:

$$Q_{1P} = c_p - C_{a_m} H_{1P} \quad (3.5)$$

$$Q_{2P} = c_n + C_{a_n} H_{2P} \quad (3.6)$$

Donde:

Q_{1P} es el gasto en el punto 1 en (t) , en m^3/s .

Q_{2P} es el gasto en el punto 2 en (t) , en m^3/s .

Q_{Tp} es el gasto que entra a la torre o sale en (t) , en m^3/s .

H_{1p} es la carga en el punto 1 en (t) , en m.

H_{2p} es la carga en el punto 2 en (t) , en m.

Z_p es la elevación del agua en la torre en (t) , en m.

Z es la elevación del agua en la torre en $(t-\Delta t)$, en m.

A_T es el área de la torre, en m^2 .

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_n} es la constante que depende de las propiedades del tubo n, en m^2/s .

C_{a_m} es la constante que depende de las propiedades del tubo m, en m^2/s .

Δt es el intervalo de tiempo, en s.

t es el tiempo, en s.

El sistema formado por las ecuaciones (3.1) a la (3.6) se puede resolver de manera fácil por sustitución.

3.2 Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un dispositivo que sirve para controlar las depresiones que se puedan dar a partir de un transitorio.

Esta estructura consiste en un tanque conectado a la línea de conducción principal por medio de una tubería de conexión que tiene, por un lado, válvulas de retención que no permiten el flujo del tanque hacia la conducción hasta que se presenta un transitorio, por lo que el nivel de agua de este puede ser menor que la piezométrica de operación que hay en la línea principal.

Por otro lado, la tubería de conexión dispone de válvulas de llenado del tanque, las cuales permiten el ingreso de agua una vez que el tanque ha operado en un transitorio.

El arreglo de la conexión de un tanque unidireccional, el cual no está operando ya que el flujo en el sistema es estacionario, con la línea de conducción principal se puede ver en la figura 3.8.

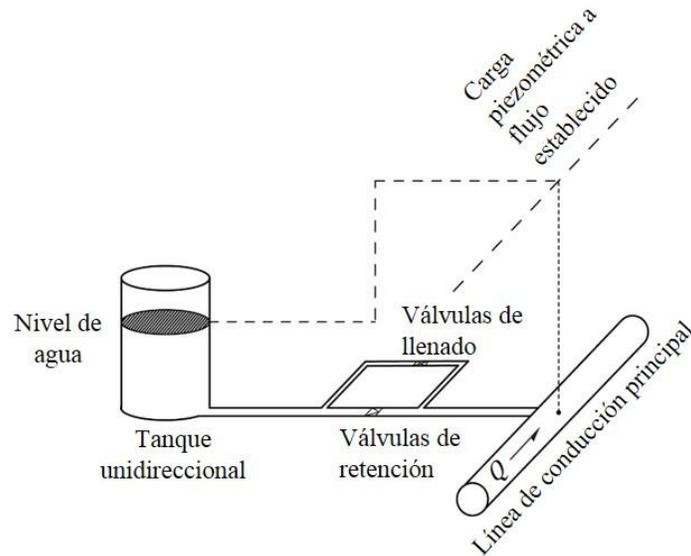


Figura 3.8: Esquema del arreglo de un tanque unidireccional (sin operar).

Un tanque unidireccional opera cuando se presenta una depresión en la tubería. Cuando la onda de baja presión llega a donde se ubica este dispositivo de control de transitorios, al ser menor la piezométrica de la conducción que el nivel del agua que hay en este, las válvulas de retención se abren y dejan fluir el agua del tanque hacia la tubería. Esto hace que la presión en la tubería no siga disminuyendo. La onda de presión no se refleja totalmente en el tanque unidireccional como ocurre en las torres de oscilación.

Para un sistema sencillo como el de la figura 3.9 con las siguientes características: gasto de $0.345 \text{ m}^3/\text{s}$, diámetro de 0.457 m , longitud de 2000 m , celeridad de 1000 m/s y un factor de fricción de 0.016 ; se puede ver cómo influye un tanque unidireccional en la línea de cargas máximas y mínimas que se genera en la conducción durante el transitorio, ver figuras 3.10 y 3.11.

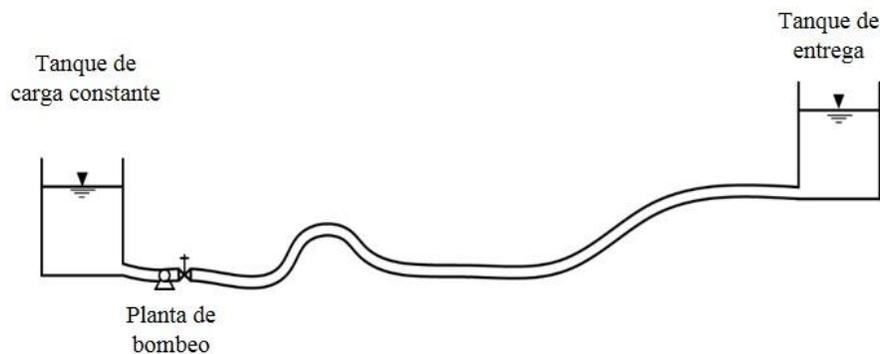


Figura 3.9: Sistema en operación.

En la figura 3.10, se observan las cargas piezométricas máximas y mínimas una vez que se presenta el transitorio, la línea de cargas mínimas alcanza a cortar al perfil del terreno, por lo que se presentarán depresiones en la tubería.

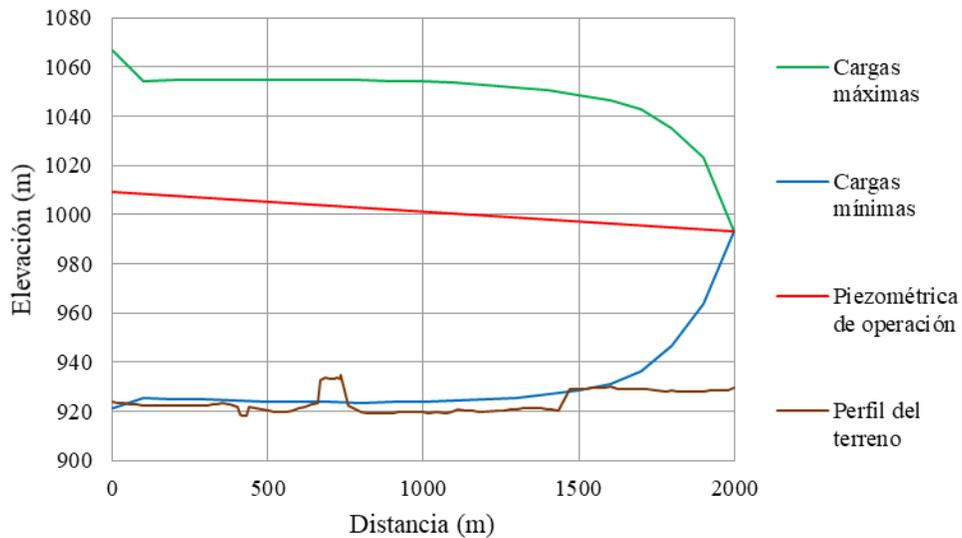


Figura 3.10: Cargas mínimas, máximas y de operación sin presencia de tanque unidireccional.

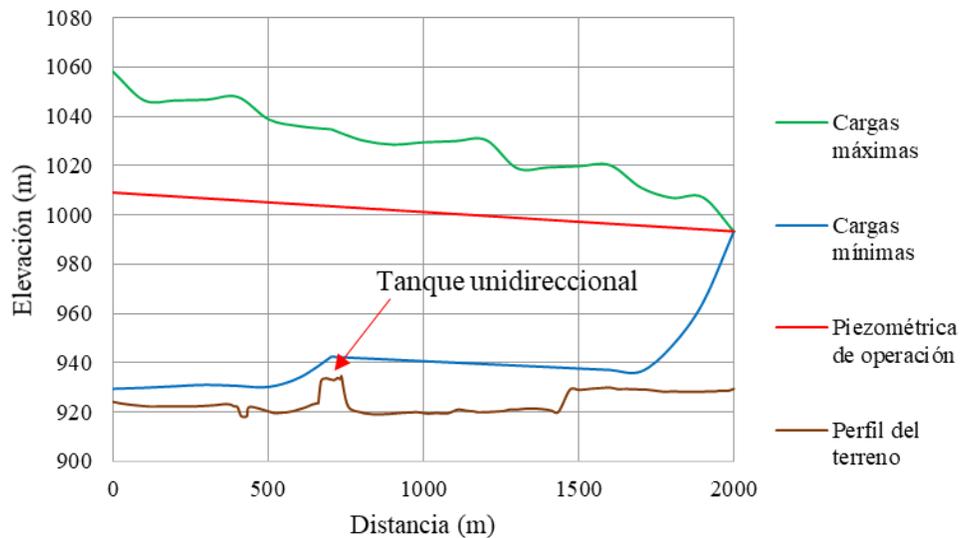


Figura 3.11: Cargas mínimas, máximas y de operación con presencia de tanque unidireccional.

Si se coloca al tanque unidireccional en el punto elevado que se muestra en la figura 3.11, la línea de cargas mínimas no sigue disminuyendo como en la figura 3.10, sino que se queda prácticamente igual al nivel de agua que hay en el tanque en la zona cercana a este.

Algunas de las ventajas que tiene un tanque unidireccional son las siguientes:

- Debido a que el nivel de agua que hay en este puede ser menor que la piezométrica en la operación a flujo establecido que hay en la tubería principal, y por ende su coronamiento también, estas estructuras pueden ser de baja altura.
- Debido a que el tanque unidireccional no refleja totalmente la onda de presión la velocidad de giro de las bombas en sentido contrario no aumenta tan rápido como con las torres de oscilación.

Las principales desventajas que un tanque unidireccional tiene son:

- Al no reflejar totalmente las ondas de presión, puede presentarse una depresión hacia los tramos aguas abajo. Por lo que en ocasiones se tendrá que instalar más dispositivos de control de transitorios en el sistema.
- Se requiere de un mantenimiento periódico de las válvulas de retención y llenado del tanque para asegurar que este opere correctamente durante un transitorio.

El modelo matemático de un tanque direccional está basado las ecuaciones (3.7) a (3.12), tomando en cuenta la figura 3.12.

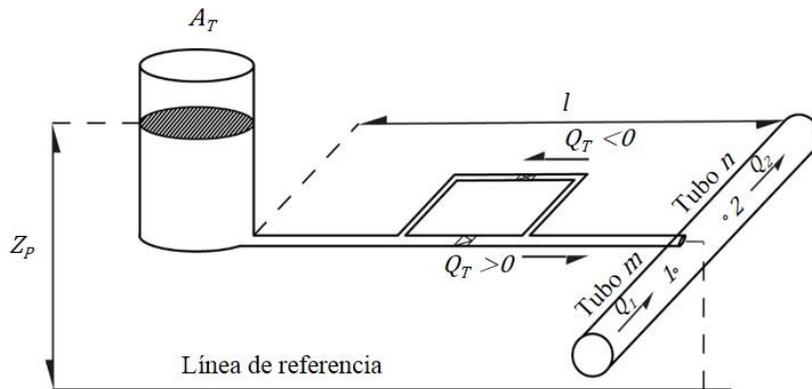


Figura 3.12: Tanque unidireccional.

$$Q_{1P} + Q_{TP} = Q_{2P} \quad (3.7)$$

$$H_{1P} = H_{2P} \quad (3.8)$$

$$Z_P - H_{1P} = \frac{l}{gA} \frac{dQ_{TP}}{dt} + \left(\frac{fl}{2gDA^2} + K_V \right) Q_{TP} |Q_{TP}| \quad (3.9)$$

$$\frac{dQ_{TP}}{dt} = \frac{Q_{TP} - Q_T}{\Delta t} \quad (3.10)$$

$$Q_{TP} = -A_T \frac{dZ_P}{dt} \quad (3.11)$$

$$\frac{dZ_P}{dt} = \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \quad (3.12)$$

Para tener el mismo número de incógnitas (Q_{1P} , Q_{TP} , Q_{2P} , Z_P , H_{1P} , H_{2P} , $\frac{dQ_{TP}}{dt}$, $\frac{dZ_P}{dt}$) que de ecuaciones, se hará uso de las ecuaciones del método de las características (3.5) y (3.6).

Donde:

Q_{TP} es el gasto que entra al tanque o sale en (t), en m^3/s .

Q_T es el gasto que entra al tanque o sale en ($t-\Delta t$), en m^3/s .

Z_P es la elevación del agua en el tanque en (t), en m.

Z es la elevación del agua en el tanque en ($t-\Delta t$), en m.

A_T es el área del tanque, en m^2 .

A es el área de la tubería de conexión, en m^2 .

D es el diámetro de la tubería de conexión, en m.

l es la longitud de la tubería de conexión, en m.

f es el coeficiente de fricción de la tubería de conexión.

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

K_V es el coeficiente de pérdida local debido a una válvula de retención o de flotador y depende de la dirección del flujo, en s^2/m^5 .

Este sistema formado por las ecuaciones (3.7) a la (3.12) y las ecuaciones (3.5) y (3.6) puede ser resuelto de manera sencilla por sustitución.

3.3 Cámara de aire

Una cámara de aire es un tanque cerrado a presión, en el cual se almacena una parte de aire comprimido y otra de agua. Dicho dispositivo amortigua de manera similar a la onda de presión a como lo hace un tanque de oscilación cuando se presenta un transitorio, salvo por el hecho de que la cámara no está abierta a la atmósfera.

En una cámara de aire, al estar cerrada a la atmósfera, el agua que entra debido a una onda de sobrepresión presiona al aire que está en la parte superior. Por otro lado, si el agua sale debido a una depresión, la parte de aire en la cámara se expande.

Una cámara de aire se conecta a la tubería principal por medio de una tubería de conexión como se muestra en la figura 3.13.

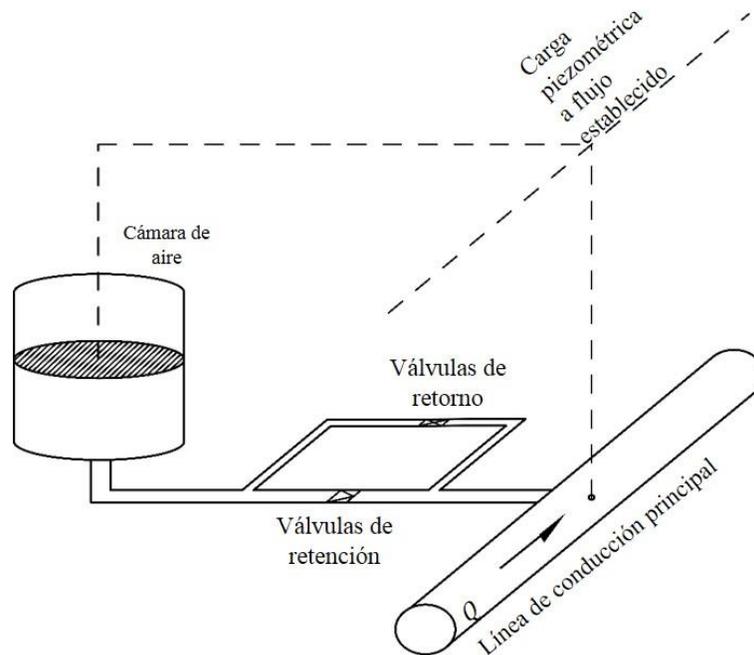


Figura 3.13: Arreglo de cámara de aire.

Como se ve en la figura 3.13, la piezométrica del conducto principal pasa por encima del nivel de agua que tiene la cámara en flujo establecido.

Para que la cámara de aire funcione correctamente, se debe mantener un volumen de aire adecuado, el cual se determina en el diseño de la cámara. Como parte del mantenimiento del sistema es necesario revisar el volumen de aire en el interior de la cámara, esto se hace por medio de mirillas que la misma cámara tiene.

Puede haber pérdidas de aire en la cámara debido a malas conexiones en la tubería o por la disolución de este aire en el agua, por lo que es necesario que haya un compresor que inyecte aire en caso de pérdidas.

Para el mismo sistema de la figura 3.9, se puede observar cómo la cámara de aire influye en la onda de presión, figura 3.14.

Para el sistema de la figura 3.9 se observa que, si no se cuenta con un dispositivo de control de transitorios, la línea de cargas mínimas corta al perfil del terreno, por lo que se presentarán depresiones en la tubería (figura 3.10). Sin embargo, si se coloca una cámara de aire cerca de la planta de bombeo, en la figura 3.14 se ve que la cámara evita que la línea de cargas mínimas continúe disminuyendo. Así mismo, se puede ver que las presiones máximas aumentaron en comparación a cuando no hay un dispositivo de control de transitorio. Estas presiones máximas pueden reducirse instalando un dissipador de energía en la línea que permite el

ingreso del agua de la conducción principal a la cámara, lo cual se revisará a fondo en el capítulo 5.

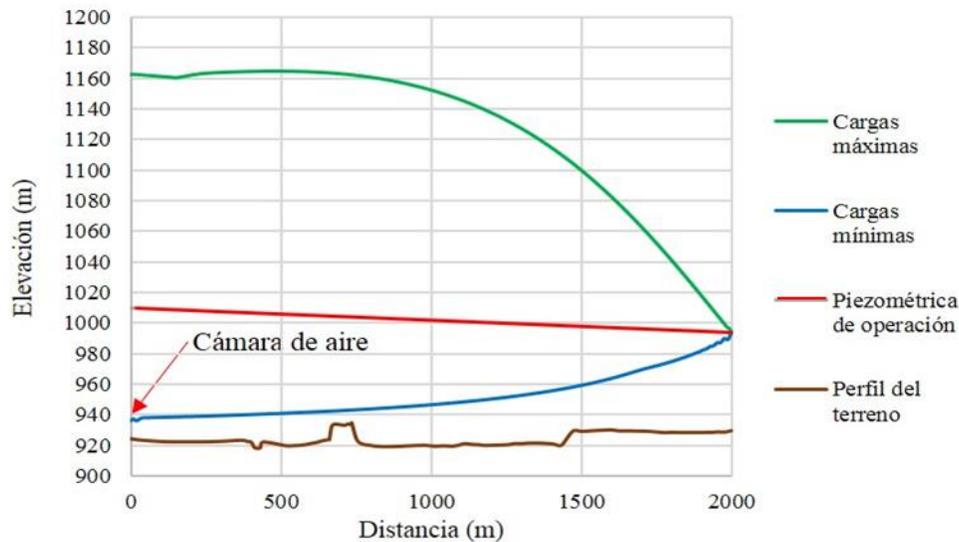


Figura 3.14: Cargas máximas, mínimas y de operación con cámara de aire.

Las ventajas que una cámara de aire tiene con respecto a los otros dispositivos para el control de transitorios son:

- La altura de la cámara no depende de la piezométrica de operación a flujo establecido, por lo tanto, estas estructuras son adecuadas para cuando la topografía del terreno es plana.
- Las cámaras de aire generalmente se colocan cerca de las plantas de bombeo, lo que facilita su mantenimiento.
- Para sistemas pequeños, generalmente no se requiere de dispositivos de control secundarios.

Las consideraciones que se deben de tener en cuenta son:

- Se debe monitorear el nivel de aire que hay dentro de esta.
- En ocasiones, cuando el volumen de aire que se requiere es grande para una sola cámara, este volumen se puede dividir en varias cámaras.

De lo anterior surgen las siguientes desventajas contra otros dispositivos de control:

- Se debe de dar un mantenimiento constante y monitorear el volumen de aire.

- En algunos casos, la presión de descarga de las bombas es mayor a la que se puede proporcionar por el compresor, en tal caso deben realizarse algunas maniobras para disponer del volumen de aire necesario.

El modelo matemático para describir una cámara de aire se basa en las ecuaciones (3.13) a (3.21), de acuerdo a la figura 3.15.

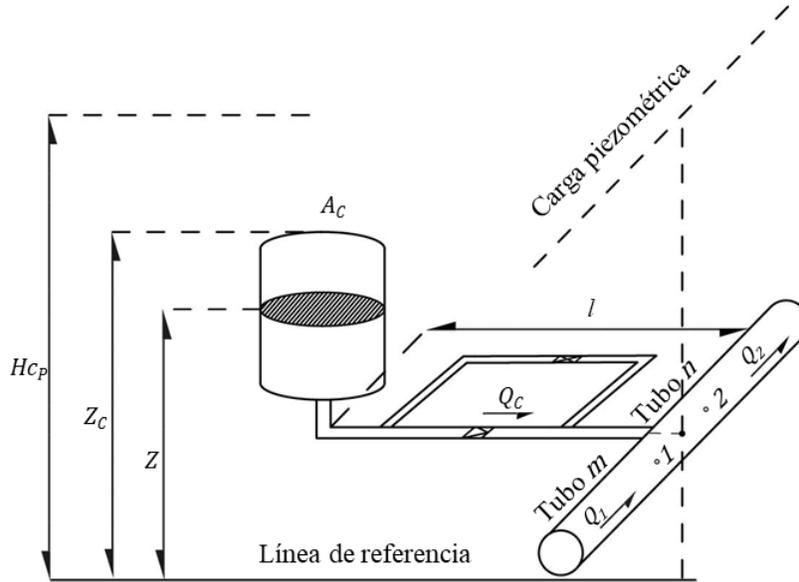


Figura 3.15: Cámara de aire.

$$Q_{2P} = Q_{C_P} + Q_{1P} \quad (3.13)$$

$$H_{1P} = H_{2P} \quad (3.14)$$

$$H_{C_P} - H_{1P} = \frac{l}{gA} \frac{dQ_{C_P}}{dt} + \left(\frac{fl}{2gDA^2} + K_V \right) Q_{C_P} |Q_{C_P}| \quad (3.15)$$

$$\frac{dQ_{C_P}}{dt} = \frac{Q_{C_P} - Q_C}{\Delta t} \quad (3.16)$$

$$H_{C_P} = Z_P + \frac{p_P - p_a}{\gamma} \quad (3.17)$$

$$\frac{dZ_P}{dt} = -\frac{Q_{C_P} + Q_C}{2} \frac{1}{A_C} \quad (3.18)$$

$$\frac{dZ_P}{dt} = \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \quad (3.19)$$

$$p_P \mathcal{V}_P^\alpha = C \quad (3.20)$$

$$\mathcal{V}_P = \mathcal{V} + (Z - Z_P)A_C \quad (3.21)$$

Para tener el mismo número de incógnitas ($Q_{1P}, Q_{C_P}, Q_{2P}, Z_P, H_{1P}, H_{2P}, H_{C_P}, \mathcal{V}_P, p_P, \frac{dZ_P}{dt}, \frac{dQ_{C_P}}{dt}$) que de ecuaciones, se hará uso de las ecuaciones del método de las características (3.5) y (3.6).

Donde:

Q_{C_P} es el gasto que entra a la cámara o sale en (t) , en m^3/s .

Q_C es el gasto que entra a la cámara o sale en $(t - \Delta t)$, en m^3/s .

Z_P es la elevación del agua en la cámara en (t) , en m.

Z es la elevación del agua en la cámara en $(t - \Delta t)$, en m.

A_C es el área de la cámara, en m^2 .

H_{C_P} es la presión en el interior de la cámara en (t) , en m.

p_P es la presión absoluta del aire en el interior de la cámara en (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 .

\mathcal{V}_P es el volumen de aire en la cámara en (t) , en m^3 .

\mathcal{V} es el volumen de aire en la cámara en $(t - \Delta t)$, en m^3 .

C es la constante.

α es el coeficiente politrópico del aire, cuyo valor suele ser de 1.2.

K_v es el coeficiente de pérdida en la entrada o salida de la cámara, en s^2/m^5 .

El sistema formado por la ecuación (3.13) a (3.21) junto con las ecuaciones (3.5) y (3.6) puede ser reducido a la siguiente ecuación no lineal, la cual se resuelve a través de un método numérico:

$$\left[\nu + \frac{\Delta t}{2} (Q_{C_P} + Q_C) \right]^\alpha \left[\left(\frac{fl}{2gDA^2} + K_V \right) |Q_{C_P}| Q_{C_P} + \left(\frac{l}{gA\Delta t} + \frac{\Delta t}{2A_C} + \frac{1}{c_{a_m} + c_{a_n}} \right) Q_{C_P} + \left(\frac{\Delta t}{2A_C} - \frac{l}{gA\Delta t} \right) Q_C - Z - \frac{c_n - c_p}{c_{a_m} + c_{a_n}} + \frac{Pa}{\gamma} \right] - C = 0 \quad (3.22)$$

Cuando se haya obtenido el valor de Q_{C_P} , se podrá calcular las demás variables de las ecuaciones por sustitución.

3.4 Válvula de admisión y expulsión de aire

En el control de transitorios, la válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) tiene el objetivo de controlar las depresiones que se presenten en la tubería, para esto la VAEA deja entrar aire a la tubería cuando la presión en el interior de la tubería llega a un cierto valor determinado por los operadores del sistema. Esta entrada de aire hace que la presión que se establezca en la tubería sea la atmosférica, evitándose así, un mayor descenso de la presión.

El volumen de aire que ingresa a la tubería depende del diámetro de la válvula y de la diferencia de presiones que hay entre el interior de la tubería y la atmósfera cuando la válvula se abre. El esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire se muestra en la figura 3.16.

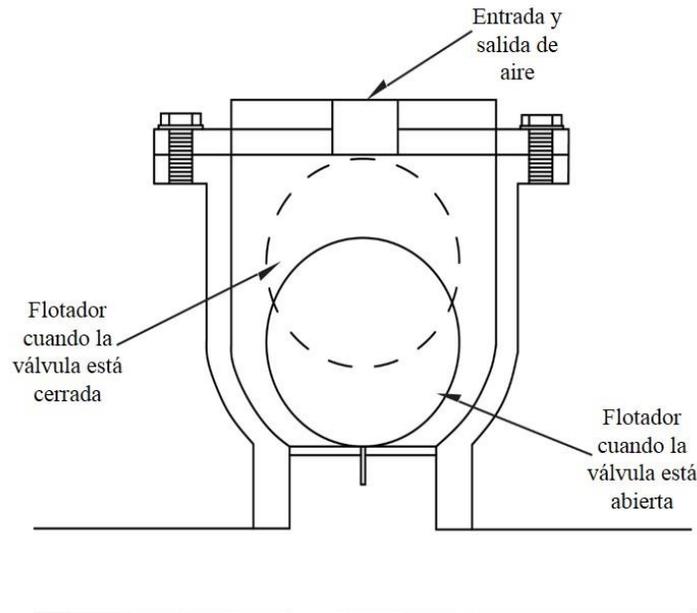


Figura 3.16: Diagrama de una VAEA.

El modelo matemático que describe la admisión de aire por parte de la válvula está basado en las ecuaciones (3.23) a (3.25), de acuerdo a la figura 3.17.

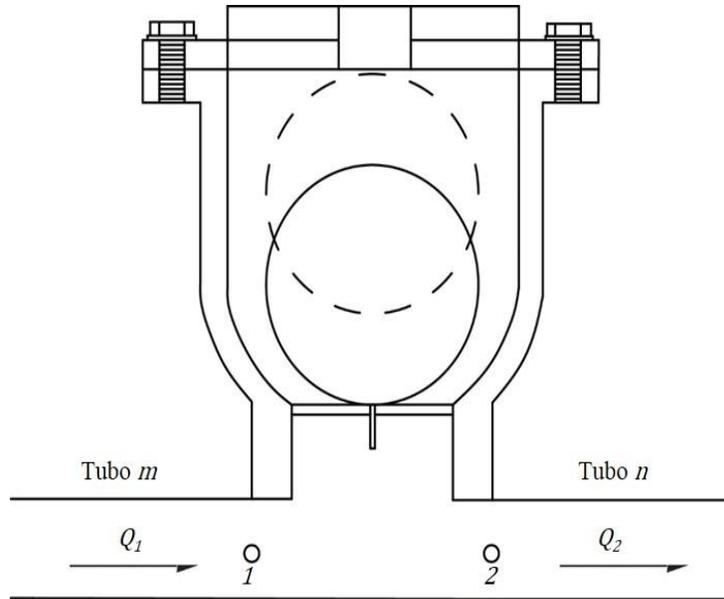


Figura 3.17: Válvula de admisión y expulsión de aire.

$$H_{1p} = Z \quad (3.23)$$

$$H_{2p} = Z \quad (3.24)$$

$$\frac{d\mathcal{V}}{dt} = Q_2 - Q_1 \quad (3.25)$$

Donde:

Q_1 es el gasto en el punto 1 en $(t-\Delta t)$, en m^3/s .

Q_2 es el gasto en el punto 2 en $(t-\Delta t)$, en m^3/s .

Z es la elevación de la válvula, en m.

Para tener el mismo número de incógnitas (Q_{1p} , Q_{2p} , H_{1p} , H_{2p} , \mathcal{V}) que de ecuaciones, se hará uso de las ecuaciones del método de las características (3.5) y (3.6).

De las ecuaciones (3.23) a (3.25) y de las ecuaciones de las características (3.5) y (3.6) se obtiene la siguiente expresión para calcular el volumen de aire que entra en el conducto en (t) . Las otras variables se obtienen por sustitución en las ecuaciones que corresponden.

$$\mathcal{V}_p = \mathcal{V} + \frac{\Delta t}{2} [Q_2 - Q_1 + (c_{am} + c_{an})Z + c_n - c_p] \quad (3.26)$$

Donde:

Δt es el intervalo de tiempo, en s.

\mathcal{V}_p es el volumen de aire en la conducción en (t) , en m^3 .

\mathcal{V} es el volumen de aire en la conducción $(t - \Delta t)$, en m^3 .

En el sistema TRANS se considera que una vez que ingresa el aire a la conducción a través de la VAEA, toda la masa de aire permanece en una región cercana al sitio de ingreso. Debido a que el golpe de ariete es un fenómeno en el que se genera una onda de presión que produce altas y bajas presiones en un mismo sitio, cuando aumenta la presión alrededor del sitio en donde está instalada la VAEA la masa de aire se comprime. El modelo de la compresión del aire está formado por las siguientes expresiones:

$$H_{1p} = H_{2p} \quad (3.27)$$

$$H_{1p} = H_{2p} = \frac{1}{\gamma} (p - p_a) + Z \quad (3.28)$$

$$p_p \mathcal{V}_p^\alpha = C \quad (3.29)$$

Para tener el mismo número de incógnitas que de ecuaciones, se hará uso de las ecuaciones del método de las características (3.5) y (3.6).

Del sistema formado por las ecuaciones (3.27) a (3.29) y las ecuaciones del método de las características (3.5) y (3.6) se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} (H_{1p} + H_a - Z) \left[\mathcal{V} + \frac{\Delta t}{2} (Q_2 - Q_1 + c_n - c_p + (c_{a_m} + c_{a_n})H_{1p}) \right]^\alpha - C \\ = 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

La ecuación (3.30) puede resolverse con el método de Newton-Raphson.

Donde:

H_a es la presión atmosférica, en mca.

p_p es la presión absoluta del aire en el interior de la conducción en (t) , en N/m^2 .

p es la presión absoluta del aire en el interior de la conducción en $(t - \Delta t)$, en N/m^2 .

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

Capítulo 4: Descripción de la interfaz del programa TRANS versión docencia

Los resultados que se obtienen al resolver las ecuaciones de golpe de ariete para analizar un transitorio hidráulico son la base para tomar decisiones en cuanto al diseño de un sistema hidráulico de tuberías a presión. Sin embargo, los análisis de transitorios resultan complejos debido a que estos sistemas generalmente están compuestos de varios accesorios y dispositivos de control de transitorios, además de cambios en las propiedades de la tubería. Teniendo esto en cuenta, se ha desarrollado el programa de análisis de transitorios hidráulicos en tuberías a presión TRANS. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión *docencia* del sistema.

Como se explicó anteriormente, el propósito del capítulo 2 y 3 es el de comprender y aplicar los conceptos básicos necesarios para el uso del programa TRANS.

En este capítulo se describirá de manera detallada el funcionamiento del programa, así como la información que este necesita para hacer la simulación de un transitorio. También se verá la manera en como TRANS proporciona los resultados de la simulación del transitorio.

4.1 Propósito de su uso y descripción general

El programa TRANS es un software desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el Dr. Rafael Carmona Paredes y la M. en C. Libia Georgina Carmona Paredes, en conjunto con el M. en C. Gabriel Castillo Hernández.

Este software permite hacer simulaciones fiables de un flujo transitorio en tuberías a presión para el diseño de sistemas hidráulicos.

Como se mencionó anteriormente, los resultados que el programa TRANS brinda se obtienen de la solución de las ecuaciones que describen el fenómeno de golpe de ariete (2.35) y (2.36) a través del método de las características, teniendo en cuenta las condiciones de frontera que se pueden presentar a lo largo del sistema y los modelos matemáticos de cada dispositivo contra transitorio presentados en el capítulo 3.

En la simulación del transitorio se contemplan las características físicas e hidráulicas del sistema, así como los sucesos que pueden generar un transitorio. El análisis parte de las condiciones a flujo establecido, por lo que es necesario hacer un análisis previo en este régimen para poder ingresar la información necesaria al programa.

Al momento de ejecutar el programa se abre un menú principal como el mostrado en la figura 4.1, este consta de dos sistemas: el sistema de archivo de datos para el programa TRANS (también llamado captura de datos) y el sistema de simulación de transitorios para el programa TRANS.



Figura 4.1: Menú principal del programa de simulación de transitorios TRANS en su versión docencia.

4.2 Archivo de datos

Para poder simular un transitorio, se necesita capturar la información del sistema con el que se trabajará, esto se hace por medio del archivo de datos.

El archivo de datos se construye con la siguiente información:

- Las características físicas del sistema: consiste en las propiedades de los tramos que conforman al sistema (diámetro, longitud, coeficiente de fricción, etc.) y los elementos hidráulicos que forman al sistema (válvulas, tanques de carga constante, torres de oscilación, etc.).
- Los eventos hidráulicos que se presentan en el sistema: estos tienen que ver con la forma en cómo opera el sistema (cierres y aperturas de válvulas o paros de bombeo.).

En la figura 4.2 se puede ver la pantalla principal del sistema de captura de datos, a esta se accede seleccionando la opción *Archivo de datos* de la figura 4.1.



Figura 4.2: Pantalla principal del sistema de captura de datos para el programa TRANS.

Esta pantalla principal consta de dos menús, el menú del documento (parte inferior) y el de navegación (parte superior).

En el menú del documento se presentan las opciones *Abrir*, *Guardar*, *Guardar como* y *Menú principal*.

Para empezar a trabajar con un archivo previamente guardado, se elige la opción *Abrir*. En caso de que se desee generar un nuevo archivo, simplemente se selecciona la opción *Tramos* del menú de navegación y se empieza a meter la información del sistema, esto último se explicará más adelante.

Al momento de haber concluido de ingresar la información del sistema en que se esté trabajando y de quererse guardar los cambios de este documento, se seleccionará la opción *Guardar*. Una vez hecho esto, se mostrará la ventana de la figura 4.3

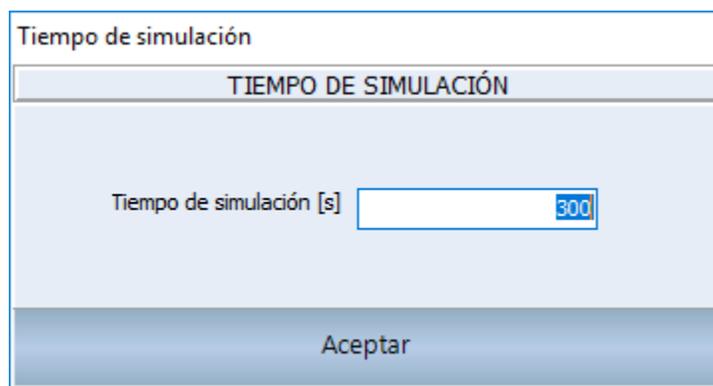


Figura 4.3: Ventana para ingresar el tiempo de simulación.

Esta pantalla muestra el tiempo en que se analiza el transitorio, a este se le llama *Tiempo de simulación*, en s. El usuario deberá ingresar un tiempo, el cual se recomienda sea de por lo menos cinco veces el tiempo en que la onda de presión desarrolla un ciclo completo (esto siempre y cuando no haya torres de oscilación o cámaras de aire):

$$T = 5 \left(\frac{4L}{a} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

L es la longitud de toda la conducción, en m.

a es la celeridad mínima de los tramos que forman la conducción, en m/s.

Una vez que se ingresa el tiempo de simulación y se acepta, se mostrará la pantalla de la figura 4.4.

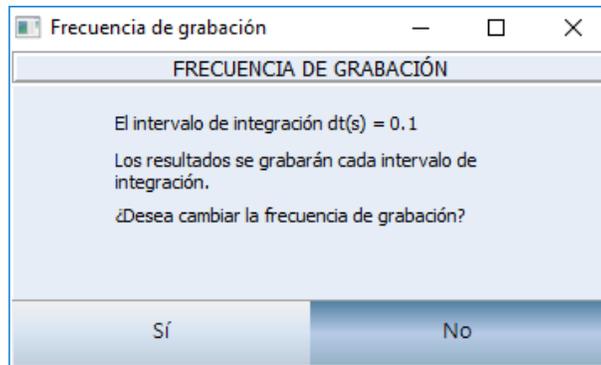


Figura 4.4: Pantalla de Frecuencia de grabación.

Esta pantalla indica la frecuencia de grabado de los resultados, el programa calcula el intervalo de integración que para este ejemplo es de 0.1 s. A través de esta pantalla el usuario puede cambiar la frecuencia con la que se graban los resultados de la simulación seleccionando la opción *Sí*. Una vez hecho esto, se mostrará la pantalla de la figura 4.5.

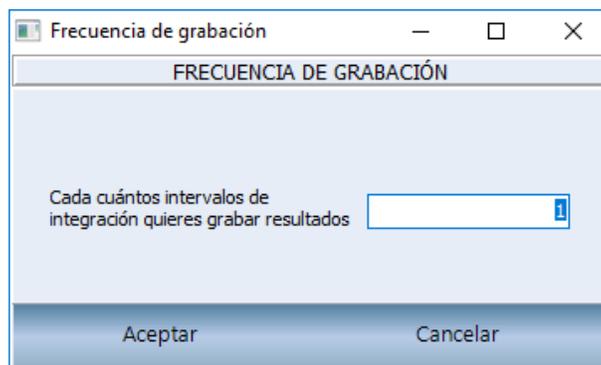


Figura 4.5: Ingreso de Frecuencia de grabación.

Una vez cambiada la frecuencia de grabación, aparecerá el siguiente mensaje mostrado en la figura 4.6.

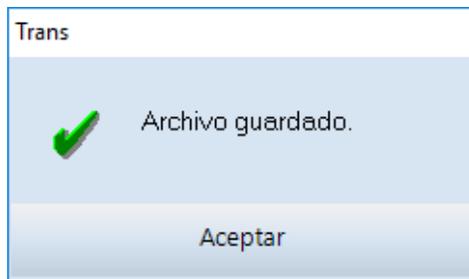


Figura 4.6: Mensaje que indica que el archivo ha sido guardado con éxito.

En caso de no querer cambiar la frecuencia de grabado, se elige *No* y enseguida se mostrará el mensaje de la figura 4.6.

El archivo de datos genera dos documentos de texto con las extensiones trs y txt con el mismo nombre del documento guardado. La extensión trs es la que se elegirá cuando se desee abrir un documento, esta es la que lee el archivo de datos. Por otro lado, la extensión txt es la que leerá el sistema de simulación de transitorios.

La opción *Guardar como* sirve para guardar un documento con otro nombre.

El archivo de datos no puede guardar un documento en el que falta información o los tramos no han sido conectados.

El menú de navegación permite al usuario construir el arreglo del sistema hidráulico que se desea analizar, sus partes se explicarán en lo sucesivo.

4.2.1. Tramos

Cuando se selecciona la opción *Tramos* del menú de navegación de la figura 4.2 aparecerá la pantalla mostrada en la figura 4.7. Es aquí donde se introducirá la información correspondiente a cada tramo de tubería del sistema hidráulico que se quiera simular.

Como se observa en la figura 4.7, han aparecido cuatro pestañas en la parte inferior, estas sirven para ingresar los datos de un tramo de tubería, para editar, dividir o para eliminar dicho tramo.

Si se selecciona *Nuevo Tramo* se mostrará la pantalla de la figura 4.8.

En esta pantalla se ingresan los datos del tramo de tubería, tales como su diámetro, su longitud, celeridad, coeficiente de fricción de Darcy – Weisbach y el gasto. Todos estos en unidades del SI.

Para cuando el gasto en flujo permanente es nulo, se ingresa la carga que hay al inicio del tramo. Por otro lado, si el gasto es diferente de cero, solo se ingresa éste.

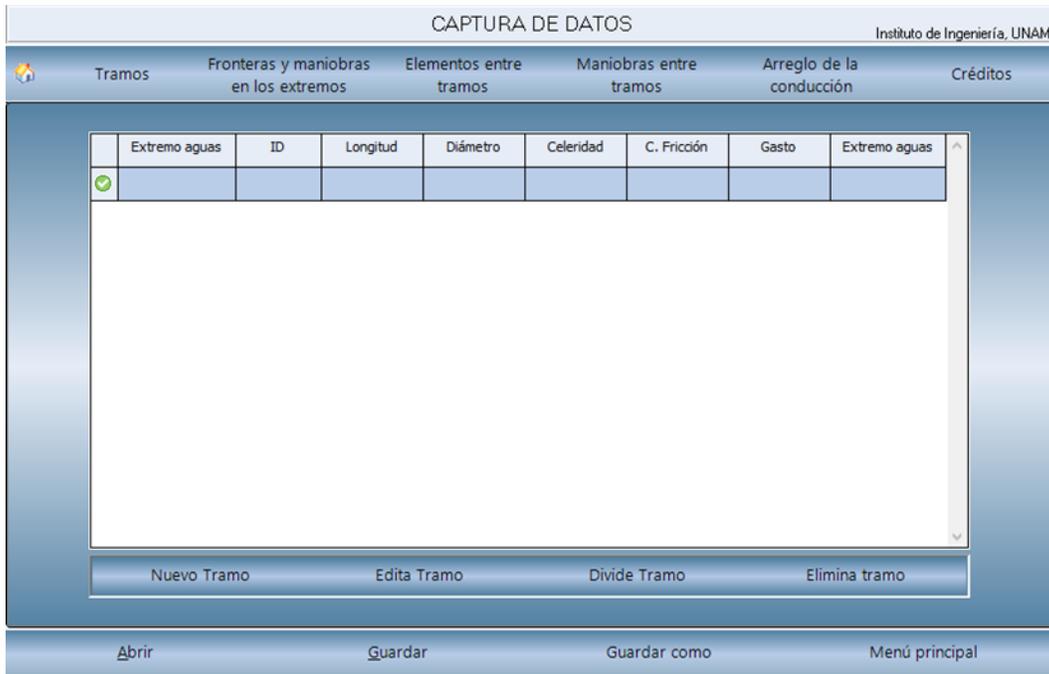


Figura 4.7: Pantalla para el ingreso de las características de cada tramo.

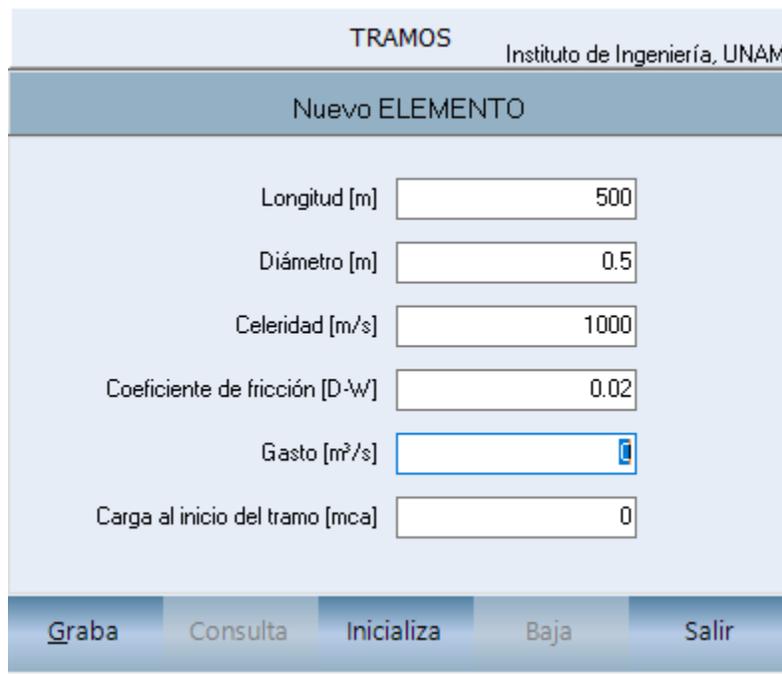


Figura 4.8: Pantalla de captura de información de un tramo.

Para guardar la información de un tramo, se selecciona la opción *Graba*. Por otro lado, si se deseara borrar todos los datos ingresados, se selecciona *Inicializa*.

Para regresar a la pantalla de la figura 4.7, se selecciona la opción *Graba* o *Salir*.

Una vez que se ha dado de alta el tramo, la pantalla de la figura 4.7 queda como se muestra en la figura 4.9.

CAPTURA DE DATOS Instituto de Ingeniería, UNAM

Tramos Fronteras y maniobras en los extremos Elementos entre tramos Maniobras entre tramos Arreglo de la conducción Créditos

Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
✓	?	TUBO 01	500.000	0.500	1000.0000	0.02000	1.000000	?

Nuevo Tramo Edita Tramo Divide Tramo Elimina tramo

Abrir Guardar Guardar como Menú principal

Figura 4.9: Tramo dado de alta en la captura de datos.

La ventana correspondiente a la figura 4.9 consta de varias celdas que muestran el arreglo del sistema, el cual se lee de izquierda a derecha en orden descendente.

La columna llamada *Extremo aguas* que se encuentra en la parte izquierda de la ventana corresponde al extremo aguas arriba del tramo, el cual, en la columna *ID* es llamado *TUBO 01*. Lo mismo ocurre con el extremo aguas abajo representado por la columna *Extremo aguas* de la parte derecha del *TUBO 01*. Los tramos están enumerados automáticamente por el programa en orden ascendente.

Las siguientes columnas de *Longitud*, *Diámetro*, *Celeridad*, *C. Fricción* y *Gasto*, corresponden a los datos ingresados en la figura 4.8.

Como se puede observar en la figura 4.9, en los extremos aguas arriba y aguas abajo de los tramos hay un signo de interrogación, esto significa que aún no se ha indicado qué hay en las fronteras o extremos del tramo. Conforme se determinan las fronteras de los tramos, los signos de interrogación desaparecen. La manera en cómo se colocan elementos en las fronteras de los tramos se explicará más adelante.

Si se desea editar los datos ingresados de cualquier tramo bastará con seleccionarlo y escoger la opción *Edita Tramo*. Si lo que se quiere es dividir el tramo en dos, se selecciona la opción *Divide Tramo* y enseguida se mostrará la pantalla de la figura 4.10.

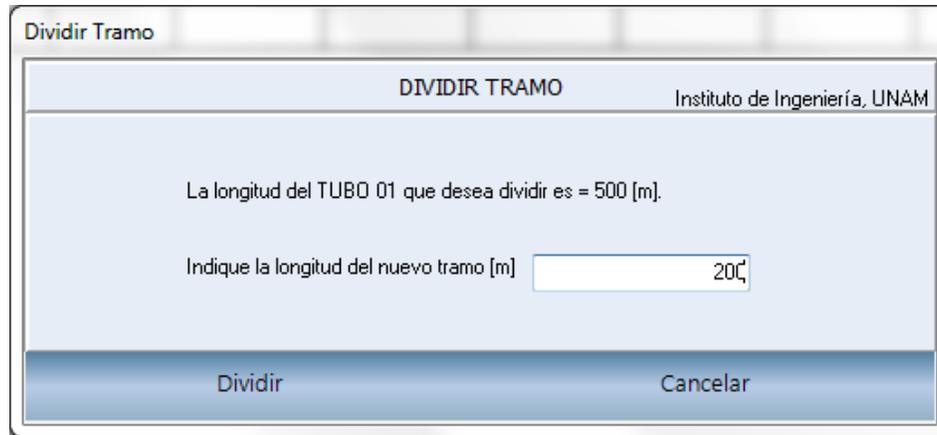


Figura 4.10: Pantalla para dividir un tramo de tubería.

La longitud del nuevo tramo a tenerse en cuenta es la que se pide en el campo *Indique la longitud del nuevo tramo [m]*, este nuevo tramo tendrá las mismas propiedades que el tramo original a excepción de su longitud. Una vez que se selecciona la opción *Dividir*, el programa da de alta al nuevo tramo y lo enumera después del original.

Si se desea eliminar un tramo, bastará con seleccionarlo y elegir la opción *Elimina Tramo*.

Para mostrar de manera más clara la representación de un sistema en el menú de captura de datos del programa se presenta el siguiente sistema (sin realizar un análisis a profundidad de las estructuras presentes en este) con las siguientes características:

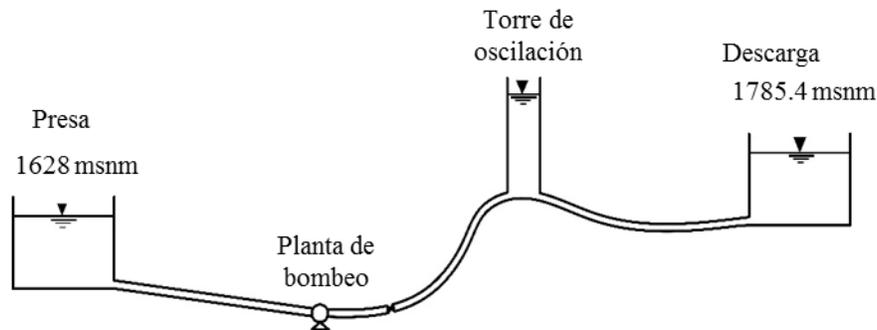


Figura 4.11: Sistema a representar en TRANS.

El sistema está formado por dos tanques de carga constante, uno en el extremo aguas arriba (Presa) y otro en el extremo aguas abajo (descarga), una planta de bombeo entre estos y una torre de oscilación aguas abajo de la planta de bombeo.

Se tienen dos tramos de tubería con las siguientes propiedades:

- Tramo 1: Que va desde la presa hasta la planta de bombeo (PB), con una longitud de 500 m, diámetro de 3.55 m, celeridad de 1000 m/s, factor de fricción de 0.0198 y por el que pasa un gasto de $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Tramo 2: Que va desde la planta de bombeo (PB) hasta la descarga, con una longitud de 4000 m, diámetro de 3 m, celeridad de 1000 m/s, factor de fricción de 0.02 y por el que pasa un gasto de 4 m³/s.

La torre de oscilación se coloca a los 4000 m de la presa y las elevaciones de esta última y el tanque de descarga se pueden ver en la figura 4.11.

El arreglo de la conducción mostrado en la figura 4.11 quedaría representado de la siguiente manera en el programa TRANS.

CAPTURA DE DATOS Instituto de Ingeniería, UNAM

Tramos	Fronteras y maniobras en los extremos	Elementos entre tramos	Maniobras entre tramos	Arreglo de la conducción	Créditos			
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas
<input checked="" type="checkbox"/>	Presa	TUBO 01	500.000	3.550	1000.0000	0.01980	4.000000	PB
	PB	TUBO 02	3500.000	3.000	1000.0000	0.02000	4.000000	TO
	TO	TUBO 03	500.000	3.000	1000.0000	0.02000	4.000000	Descarga

Figura 4.12: Representación del sistema en el programa TRANS.

Como se puede ver en la figura 4.12, se han dado de alta los tramos *TUBO 02* y *TUBO 03*, correspondientes al tramo 2 de la figura 4.11. Esto se ha hecho con el fin de colocar la torre de oscilación entre ambos tubos.

El arreglo se puede entender de la siguiente manera: la presa es la frontera aguas arriba del *TUBO 01*, le sigue la planta de bombeo *PB*, que a su vez se encuentra en la frontera aguas arriba del *TUBO 02*. Al *TUBO 02* le sigue la torre de oscilación *TO* en su frontera aguas abajo, y esta última está en la frontera aguas arriba del *TUBO 03*. El *TUBO 03* tiene como frontera aguas abajo al tanque de carga constante llamado *Descarga*.

Más adelante se indica cómo se introducen las características de las fronteras, la torre y la bomba, y la forma en cómo se unen los elementos.

4.2.2 Fronteras y maniobras en los extremos

Al seleccionar un tramo y escoger en el menú de navegación la opción *Fronteras y maniobras en los extremos*, se despliega un submenú que contempla las fronteras aguas arriba y aguas abajo de dicho tramo como lo mostrado en la figura 4.13.

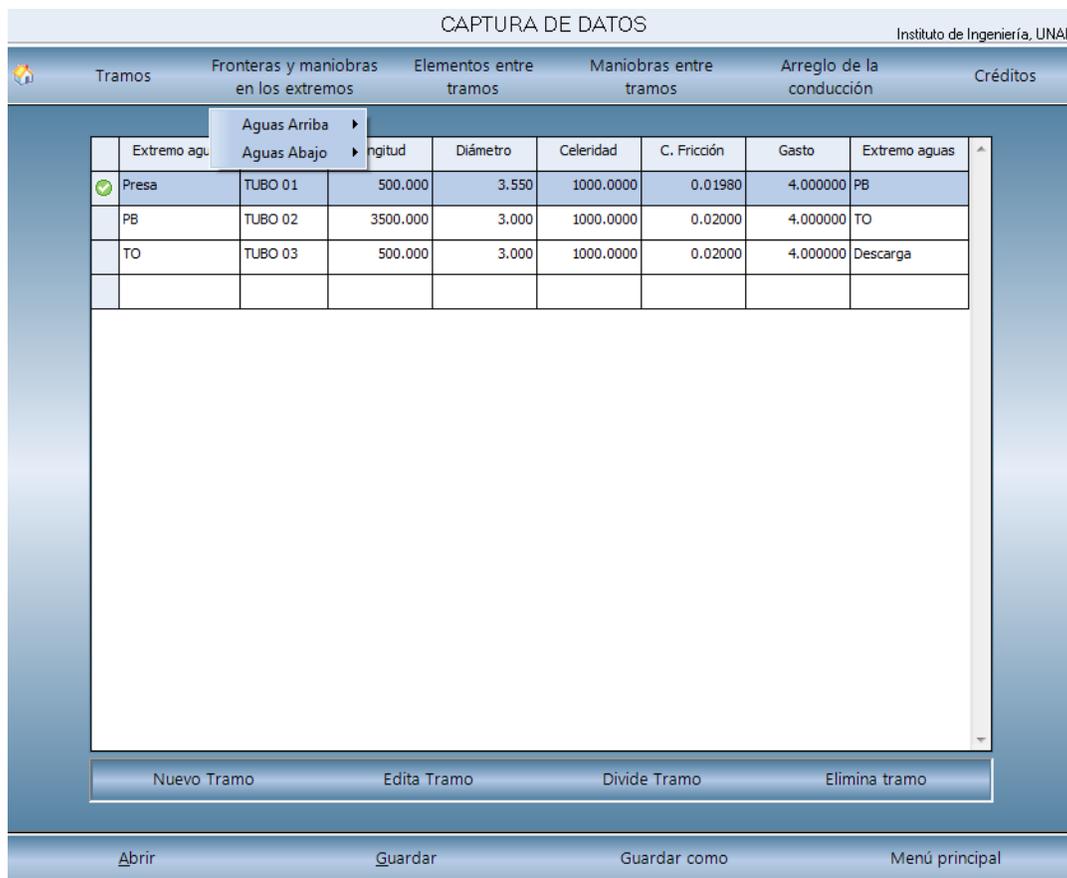


Figura 4.13: Submenú de Fronteras y maniobras en los extremos.

Para la pestaña *Aguas arriba* se tienen las fronteras de *Tanque de carga constante* y *Paro súbito de bombeo*. Por otro lado, para *Aguas abajo*, se tienen las fronteras de *Cierre de válvulas* y *Tanque de carga constante*.

4.2.2.1 Tanque de carga constante

Cuando se selecciona la opción *Tanque de carga constante* en la pestaña *Aguas arriba* aparecerá una ventana como la de la figura 4.14.

TANQUE DE CARGA CONSTANTE		Instituto de Ingeniería, UNAM
Existentes:	<input type="text"/>	Edición de Presa
Nombre	<input type="text" value="Presa"/>	
Tramo aguas abajo	<input type="text" value="TUBO 01"/>	
Carga (msnm)	<input type="text" value="1628"/>	
Cadenamiento del embalse [m]	<input type="text" value="0"/>	
<input type="button" value="Graba"/> <input type="button" value="Consulta"/> <input type="button" value="Inicializa"/> <input type="button" value="Baja"/> <input type="button" value="Salir"/>		

Figura 4.14: Ventana para tanque de carga constante.

Si se selecciona el campo denominado como *Existentes*, se podrá ver la información de otros elementos que hayan sido dados de alta previamente, para el caso de las fronteras aguas arriba y aguas abajo en la versión docencia de TRANS sólo puede haber un elemento de este tipo dado de alta.

Los demás campos corresponden al nombre del elemento (*Nombre*), el cual el usuario ingresa; el tramo que se encuentra aguas abajo del tanque (*Tramo aguas abajo*), la carga que corresponde a la elevación de la superficie libre del agua (*Carga [m]*), y el cadenamiento en donde se encuentra el embalse (*Cadenamiento del embalse [m]*).

Una vez que se ingresan los datos de dicho elemento, se da de alta seleccionando la opción *Grabar*. La opción *Inicializa* tiene el mismo significado que para lo indicado en la figura 4.8 de la sección 4.2.1.

La opción *Baja* elimina el elemento previamente dado de alta y la opción *Salir* sirve para regresar al menú de la figura 4.13.

Para el caso del tanque de carga constante en la frontera aguas abajo, la pantalla que se abre es la de la figura 4.15.

TANQUE DE CARGA CONSTANTE		Instituto de Ingeniería, UNAM
Existentes:	<input type="text" value="Descarga"/>	Edición de Descarga
Nombre	<input type="text" value="Descarga"/>	
Tramo aguas arriba	<input type="text" value="TUBO 03"/>	
<input type="button" value="Graba"/> <input type="button" value="Consulta"/> <input type="button" value="Inicializa"/> <input type="button" value="Baja"/> <input type="button" value="Salir"/>		

Figura 4.15: Pantalla para ingresar la información de un tanque de carga constante para la frontera aguas abajo.

En este caso, los campos en los que el usuario debe ingresar los datos son el de *Nombre* y *Tramos aguas arriba*.

4.2.2.2 Paro súbito de bombeo

El paro súbito de las bombas en una planta de bombeo incluye la información correspondiente al cierre de las válvulas de la descarga y a la operación de las bombas en un transitorio.

Los campos para ingresar los datos cuando se tiene un paro súbito de bombeo se muestran en la figura 4.16.

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO AGUAS ARRIBA Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: Nuevo ELEMENTO

Nombre Tramo aguas abajo

Número de bombas Elevación del nivel de succión [msnm]

Instante en que inicia el disparo [s] Cadenamiento planta de bombeo [m]

Tipo de válvulas en la descarga de las bombas:

Válvula de control

Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga:

Tiempo de cierre de las válvulas [s]

Instante en que inicia el cierre después del disparo [s]

Posición de las válvulas a gasto establecido [°]

Posición de la válvula [°]:
Abierta[0°]
Cerrada[90°]

Coefficiente mínimo de pérdida [s²/m⁵]

Coefficientes del polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + \dots + a_6\tau^6$

a0 =

a1 =

a2 =

a3 =

a4 =

a5 =

a6 =

Datos bombas

Ángulo máximo de las curvas fh y fβ 275
 $270 \leq \theta \leq 360$

Incremento angular entre puntos 0
 $1 \leq \Delta\theta \leq 10$

Gasto de diseño [m³/s]

Carga de diseño [m]

Velocidad de diseño [rpm]

Eficiencia máxima 0
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [kg·m²]

$[N_s] = \frac{rpm \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$ Velocidad específica [N_s] 0
(Opcional)

Captura datos curva fh

Captura datos curva fβ

Observaciones...

Graba Consulta Inicializa Baja Salir

Figura 4.16: Pantalla para ingresar datos del paro súbito de bombeo.

El campo *Existentes* tiene el mismo significado que para el de la figura 4.14 de la sección 4.2.2.1.

Para identificar a la planta de bombeo de que se trate, se ingresa el nombre de esta.

En el apartado *Número de bombas* se indica cuántas bombas operan en la planta de bombeo.

Se considera que en la planta de bombeo todas las válvulas y bombas son iguales y estas últimas paran de manera simultánea. Sin embargo, cuando se tienen varias plantas de bombeo, las bombas que hay en éstas pueden ser diferentes.

El instante de disparo se indica en el campo *Instante en que inicia el disparo[s]*.

El campo *Tramo aguas abajo* indica el nombre de la sección que se encuentra aguas abajo de la planta de bombeo.

La *Elevación del nivel de succión [msnm]* se refiere a la cota de la superficie libre del agua que hay en el cárcamo de bombeo y el *Cadenamiento planta de bombeo [m]* es la ubicación de dicha planta con respecto a la topografía de la zona.

Según el tipo de válvulas que haya en la descarga de la bomba el programa pedirá cierto tipo de información.

Cuando la válvula es de cierre controlado, en el apartado de *Datos de las válvulas en la descarga* se tienen los campos de: *Tiempo de cierre de las válvulas [s]*, el cual indica el tiempo que tardan las válvulas en cerrar; *Instante en que inicia el cierre después del disparo [s]*, en donde el usuario ingresa el instante en que empieza a operar la válvula después del paro de las bombas, si este es igual a cero, la válvula comienza a cerrar en el momento en que para la bomba; y la *Posición de las válvulas a gasto establecido [°]*, en donde 90° representa a la válvula totalmente cerrada y 0° indica que la válvula está abierta.

Para el caso de una válvula de control, su operación queda representada mediante el *Coefficiente mínimo de pérdida [s²/m⁵]*, que el fabricante suele proporcionar de manera adimensional, y los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 y a_6 del polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3 + a_4\tau^4 + a_5\tau^5 + a_6\tau^6$.

El procedimiento para obtener estos coeficientes con base en la información proporcionada por el fabricante se puede consultar en el anexo A1 de la Ref. 3.

Para el caso de una válvula de retención, el programa únicamente requiere el *Coefficiente mínimo de pérdida [s²/m⁵]*, esto se muestra en la figura 4.17.

La operación de las bombas en flujo transitorio queda representada por la información de las curvas adimensionales de carga y momento fh y $f\beta$. Estas curvas resultan de graficar la carga o el momento contra un ángulo θ . El procedimiento para obtener estas gráficas se detalla en el anexo A2 de la Ref. 3.

En las figuras 4.18 y 4.19 se muestran algunos ejemplos de las curvas fh y $f\beta$. Estas no deben tener saltos abruptos en su forma, ya que esto indicaría una mala representación o un error en los datos de estas.

En el apartado Datos de las bombas, el primer campo a ingresar es el de *Ángulo máximo de las curvas fh y $f\beta$* , en el cual se indica el intervalo de operación de las bombas representado por tales curvas. Para el caso en el que la válvula en la descarga de la bomba sea una válvula de control, el ángulo máximo debe estar entre 270° y 360° , sin embargo, para una válvula de retención, el ángulo debe ser de 90° , esto último se puede ver en la figura 4.17.

El *Incremento angular entre puntos* se refiere a la frecuencia en la información de las curvas, generalmente se recomienda que este valor sea menor o igual a cinco grados, ya que así se puede tener una buena aproximación de la operación de las bombas.

Los campos de *Gasto de diseño $[m^3/s]$* , *Carga de diseño $[m]$* y *Velocidad de diseño $[rpm]$* corresponden a la *Eficiencia máxima* de la bomba, la cual se ingresará en un rango de 0 a 1.

Con las unidades del gasto, carga y velocidad de diseño, se puede calcular la velocidad específica N_s con la expresión mostrada en la figuras 4.16 y 4.17, esta se puede ingresar o no, ya que sirve para identificar a la bomba.

Cabe mencionar que, para ingresar esta información, se debe haber seleccionado un tipo de bomba con base en el análisis de la curva del sistema y la curva de la bomba, este procedimiento se puede ver a detalle en la Ref. 2.

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO AGUAS ARRIBA Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: Nuevo ELEMENTO

Nombre Tramo aguas abajo

Número de bombas Elevación del nivel de succión [msnm]

Instante en que inicia el disparo [s] Cadenamiento planta de bombeo [m]

Tipo de válvulas en la descarga de las bombas:
 Válvula de control
 Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga :
 Coeficiente mínimo de pérdida [s^2/m^5]

Datos bombas:
 Ángulo máximo de las curvas fh y fb
 Incremento angular entre puntos
 $1 \leq \Delta\theta \leq 10$
 Gasto de diseño [m^3/s]
 Carga de diseño [m]
 Velocidad de diseño [rpm]
 Eficiencia máxima
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [$kg \cdot m^2$]
 $[N_s] = \frac{rpm \cdot \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$ Velocidad específica [N_s]
 (Opcional)

Observaciones...

Figura 4.17: Información a ingresar cuando se trata de una válvula de retención.

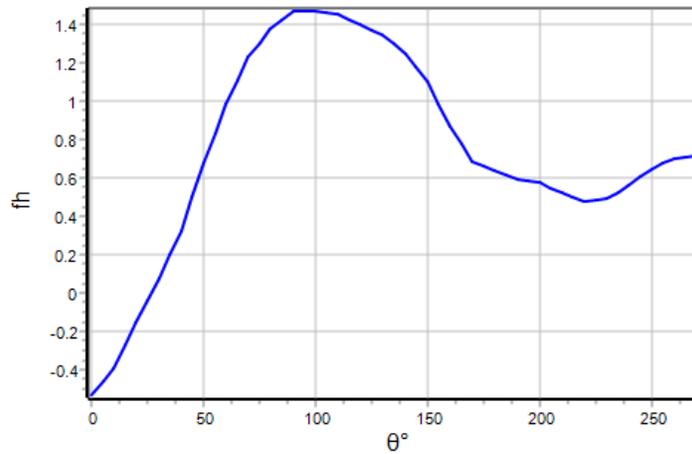


Figura 4.18: Curva de carga fh.

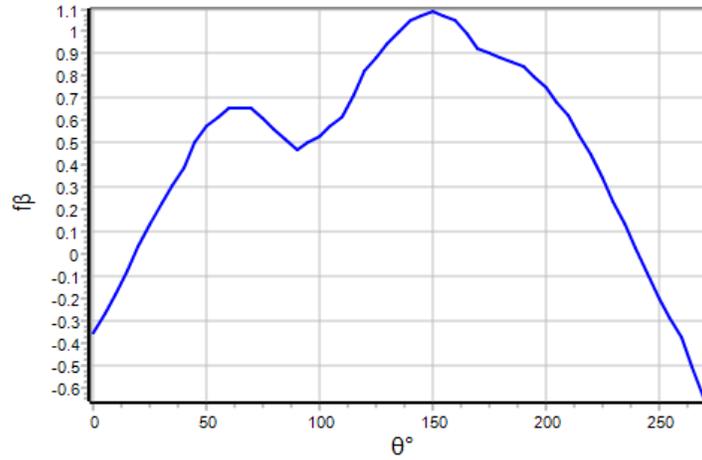


Figura 4.19: Curva de momento $f\beta$.

Si se selecciona el botón de *Captura de datos curva fh* o el de *Captura de datos curva fβ*, se desplegarán las ventanas de las figuras 4.20 y 4.21, respectivamente.

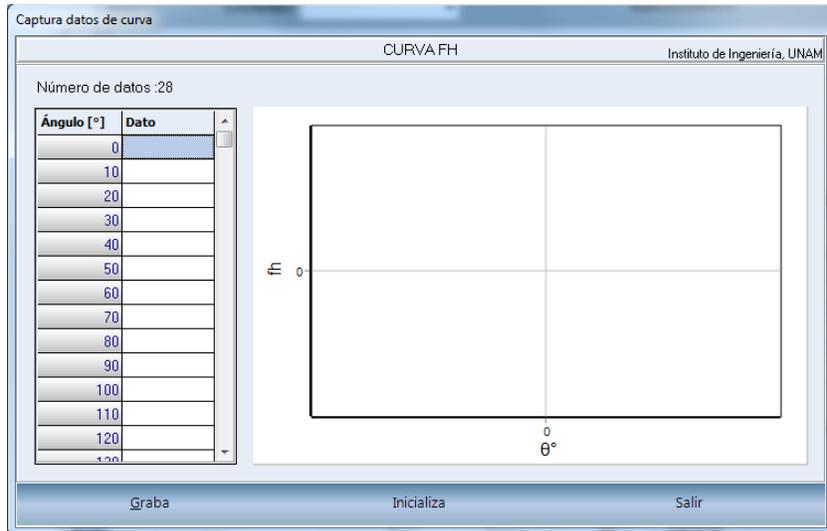


Figura 4.20: Menú para ingresar los datos de la curva de carga fh .

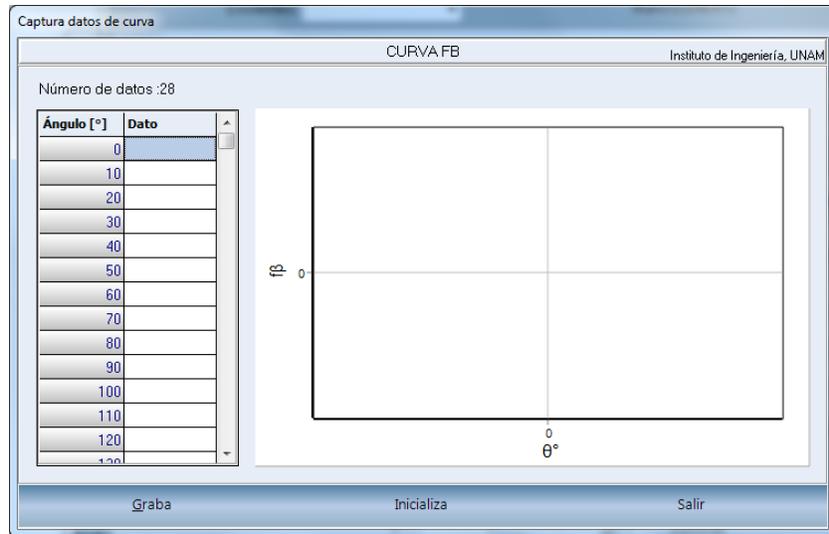


Figura 4.21: Menú para ingresar los datos de la curva de momento $f\beta$.

El eje de las abscisas es representado por la columna de nombre *Ángulo*, la cual contiene todos los valores de θ que, para el caso de una válvula de control, puede ir de 0° a $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, dependiendo del ángulo máximo que se haya elegido. Si se tiene una válvula de retención, θ irá de 0° a 90° .

El eje de las ordenadas está representado por la columna de la derecha denominada como *Dato*. Esta contiene los valores de fh o $f\beta$ según sea el caso. Estos valores se pueden ingresar de forma manual o se pueden pegar desde una hoja de cálculo.

Una vez que se haya ingresado toda la información necesaria para la representar a la bomba, su válvula en la descarga y el tiempo en que ocurre el paro o disparo de la bomba, se debe seleccionar la opción *Graba* para dar de alta esta maniobra.

4.2.2.3 Cierre de válvulas

Al momento de seleccionar el cierre de válvulas para la frontera aguas abajo del submenú de la figura 4.13, se mostrará una pantalla como la de la figura 4.22.

CIERRE DE VÁLVULAS Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: Nuevo ELEMENTO

Nombre Tramo aguas arriba

Tiempo de cierre [s]

Instante en el que inicia a operar la válvula [s]

Posición de la válvula en flujo establecido [°]

Posición de la válvula [°]:
 Abierta[0°]
 Cerrada[90°]

Coefficiente mínimo de pérdida [s²/m⁵]

Coeficientes del polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + \dots + a_6\tau^6$

a0 =
 a1 =
 a2 =
 a3 =
 a4 =
 a5 =
 a6 =

Observaciones...

$P(\tau) = \log(k/k \text{ min})$

Figura 4.22: Pantalla de ingreso de información para el cierre de válvulas en la frontera aguas abajo.

Los campos en los que se debe ingresar información son: el *Nombre*, el *Tiempo de cierre [s]* de las válvulas con respecto a su posición inicial en flujo permanente, el *Instante en el que inicia a operar la válvula [s]*, es decir, el instante en que esta se empieza a cerrar y el *Tramo aguas arriba*, en donde el usuario indica el número de tramo que está conectado con la válvula.

Como se observa en la figura 4.22, el programa pide, al igual que para un paro súbito de bombeo, el *coeficiente mínimo de pérdida* y los *Coeficientes del polinomio* $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3 + a_4\tau^4 + a_5\tau^5 + a_6\tau^6$, estos se pueden obtener también con el método descrito en el anexo A.1 de la Ref. 3.

Una vez ingresada la información necesaria se elige la opción *Grabar*.

Hasta el momento se ha explicado cómo dar de alta estas maniobras o elementos en las fronteras aguas arriba o aguas abajo de cada tramo, sin embargo, el programa permite borrar tales maniobras o elementos. Para ello se tiene que ir al menú de *Elementos y maniobras en los extremos*, seleccionar la opción *Aguas arriba* o *Aguas abajo*, según sea el caso, e ir a la

maniobra o elemento a borrar (*Paro súbito de bombeo, Tanque de carga constante o Cierre de válvulas*).

Una vez que se ha hecho el procedimiento anterior, se mostrará la pantalla de ingreso de datos de la maniobra o elemento, según sea el caso. En el campo *Existentes* se elige el elemento o maniobra a borrar, el cuál debe aparecer ya que se ha dado de alta previamente, y se selecciona la opción *Baja*.

En el caso de que en el sistema de bombeo se tengan varias plantas de bombeo, tanques o cierres de válvulas y se desee agregar otra nueva maniobra o elemento se necesitará ingresar la información correspondiente a este.

Para el caso de bombas, en donde se desee ingresar la información de una nueva planta de bombeo, el programa muestra un mensaje preguntando si se desea copiar la información de una planta de bombeo dada de alta previamente como se muestra en la figura 4.23.

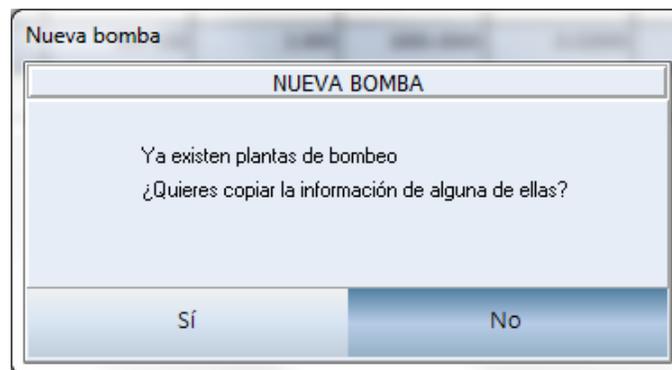


Figura 4.23: Pantalla para copiar información de una planta de bombeo a otra nueva.

Esta pantalla pretende el facilitar al usuario el ingreso de información de una nueva maniobra (en este caso de tipo *Paro súbito de bombeo*) en la cual la información se copia de una maniobra dada de alta anteriormente, a la que se va a crear.

4.2.3 Elementos entre tramos

Los elementos o estructuras hidráulicas entre tramos que el programa TRANS versión docencia tiene contemplados para su simulación, son los que se muestran en la figura 4.24 si se elige la opción *Elementos entre tramos* en el menú de navegación.

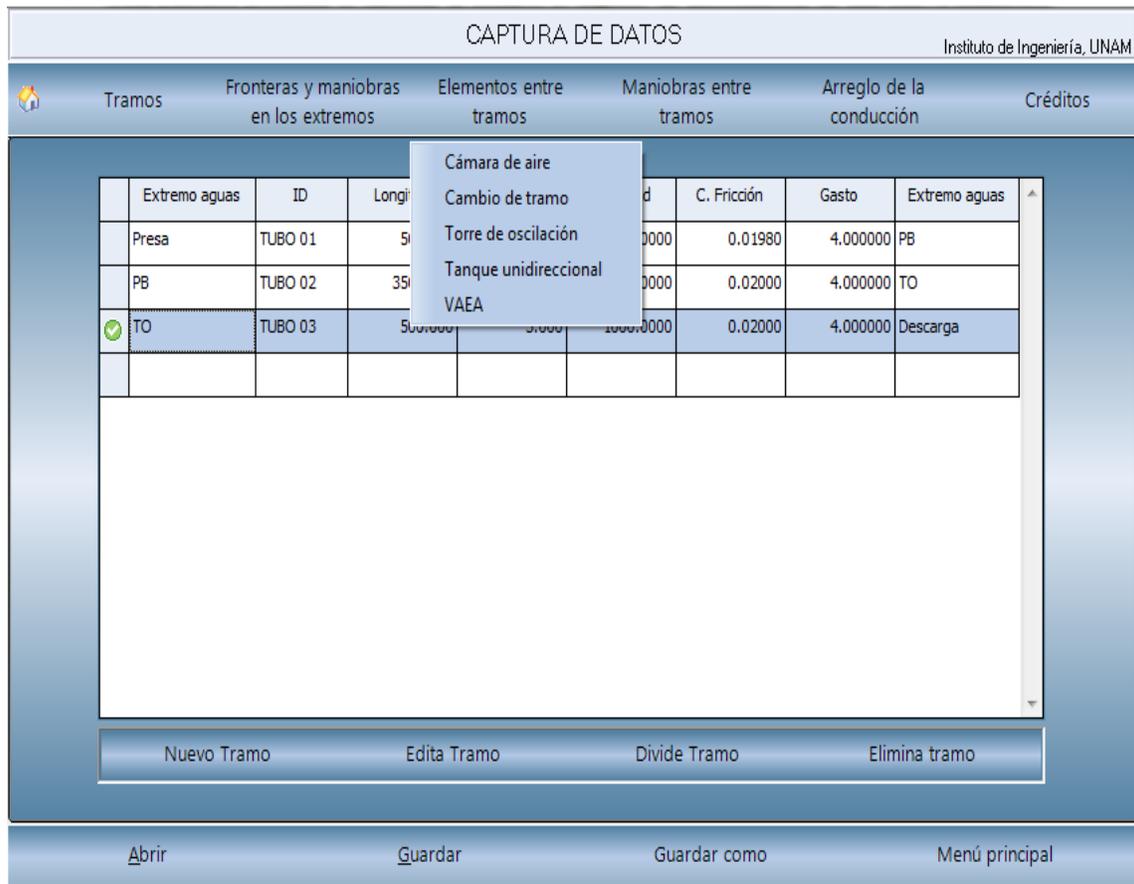


Figura 4.24: Submenú de Elementos entre tramos.

4.2.3.1 Cámara de aire

Al momento de elegir la opción cámara de aire en el submenú de *Elementos entre tramos* se desplegará la pantalla que se muestra en la figura 4.25.

The screenshot shows the 'CÁMARA DE AIRE' (Air Chamber) data entry screen from the Instituto de Ingeniería, UNAM. It features a dropdown menu for 'Existentes:' and a 'Nuevo ELEMENTO' section. The form includes input fields for: Nombre, Coeficiente de pérdida a la salida de la cámara [s^2/m^5], Volumen de aire inicial en la cámara [m^3], Área de la cámara [m^2], Cota del agua en la cámara [msnm], Elevación base de la cámara [msnm], Coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara [s^2/m^5], Tramo aguas arriba, Tramo aguas abajo, Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m], and Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m]. At the bottom are buttons for 'Graba', 'Consulta', 'Inicializa', 'Baja', and 'Salir'.

Figura 4.25: Pantalla de ingreso de información para una cámara de aire.

Como se vio en la sección 4.2.2, parte de la información a ingresar en cada maniobra o elemento es su ubicación en el sistema de bombeo. Para el caso de los elementos entre tramos, todos estos contienen los siguientes campos: *Nombre*, con el cual se identifica al elemento; *Tramo aguas arriba* y *Tramo aguas abajo*, con los que se ubica al elemento entre tramos. Además, en cada elemento se tiene el campo *Existentes*.

Para cuando se trata de una cámara de aire, además de los campos mencionados anteriormente, se tiene el *Coefficiente de pérdida a la salida de la cámara* [s^2/m^5], el cual indica el coeficiente de pérdida K en s^2/m^5 que hay entre la tubería de conexión y la línea de conducción principal cuando el flujo de agua va desde la cámara hacia la conducción. Para cuando el flujo va desde la línea de conducción principal hacia la cámara, el coeficiente K es el que se indica en el campo *Coefficiente de pérdida a la entrada de la cámara* [s^2/m^5].

El *Volumen de aire inicial en la cámara* [m^3] es el volumen que tiene la cámara en la operación a flujo establecido. Este se puede calcular de manera preliminar para realizar los primeros análisis con el método presentado en el anexo 8 de la Ref. 4.

En el campo *Área de la cámara* [m^2] se introduce el área transversal que esta va a tener, en un principio se ingresa un área preliminar que puede calcularse con el método presentado en el anexo 8 de la Ref. 4. Este método sirve para darse una idea preliminar del área que puede tener la cámara.

Para llegar a un resultado final en el volumen de aire, área transversal y elevación de la superficie libre del agua en la cámara, se hacen varias simulaciones en las que se revisa que la cámara no se vacíe.

En el campo de la *Cota del agua en la cámara* [$msnm$] se ingresará la elevación de la superficie libre del agua en condiciones de operación.

La *Elevación de la base de la cámara* [$msnm$] tiene que ver con la topografía del lugar y en dónde se decida colocar la cámara.

Al momento de realizar la simulación del transitorio, si la cámara se vacía, el programa enviará un mensaje preguntando si se desea suspender la simulación o si se continúa, esto último con la finalidad de conocer el nivel mínimo del agua.

A partir de esta primera simulación se pueden hacer modificaciones al área de la cámara, su volumen inicial y hasta su ubicación.

Si el programa no manda algún mensaje de error, el programa simplemente terminará la simulación.

También se debe ingresar la información de la longitud y diámetro de la tubería de conexión en los campos *Longitud de la tubería de conexión cám-conducción* [m] y *Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción* [m], respectivamente. La tubería de conexión es una parte importante del arreglo de una cámara de aire como lo muestra la figura 3.12 del capítulo 3.

Se sugiere que la velocidad del agua sea menor que 4 m/s, Ref. 4.

4.2.3.2 Cambio de tramo

Cuando se selecciona la opción *Cambio de tramo* del submenú *Elementos entre tramos*, aparecerá la pantalla mostrada en la figura 4.26.

The screenshot shows a software window titled "CAMBIO DE TRAMO" from the "Instituto de Ingeniería, UNAM". The window is divided into several sections. At the top, there is a header bar with "Existentes:" followed by a dropdown menu on the left and "Nuevo ELEMENTO" on the right. Below this, the main area contains a "Nombre" text input field, two dropdown menus labeled "Tramo aguas arriba" and "Tramo aguas abajo", and a checkbox labeled "Registro de carga y gasto en la unión de los tramos". At the bottom of the window, there is a navigation bar with five buttons: "Graba", "Consulta", "Inicializa", "Baja", and "Salir".

Figura 4.26: Pantalla de ingreso de información para un cambio de tramo.

Como su nombre lo indica, este elemento se usa cuando se tienen tramos con diferentes características en el sistema hidráulico. En la figura 4.26, además de los campos ya conocidos de *Nombre*, *Tramo aguas arriba* y *Tramo aguas abajo*, se puede activar la opción *Registro de carga y gasto en la unión de los tramos*. Con esta opción se indica que en los archivos de datos se registren dichas variables en función del tiempo en esa unión entre tramos.

4.2.3.3 Torre de oscilación

Cuando se elige la opción *Torre de oscilación* en el submenú *Elementos entre tramos*, se mostrará la pantalla de la figura 4.27.

En el campo *Desplante [msnm]*, se pide el nivel al cual se va a desplantar la torre, este tiene que ver con la topografía que sigue la línea de conducción principal. Generalmente se recomienda el poner estas estructuras en puntos altos de la topografía.

En los campos *Área del tanque [m²]* y *Altura del tanque [m]* se ingresan el área transversal de la torre de oscilación, la cual se considera constante, y su altura respectivamente. El predimensionamiento de una torre de oscilación se puede realizar con el método propuesto en el anexo 7 de la Ref. 4, sin embargo, las dimensiones definitivas de la torre deben determinarse a través de varias simulaciones.

Con estas simulaciones se revisa que el nivel del coronamiento de la torre no sea rebasado por la piezométrica, de lo contrario, el programa arrojará un mensaje preguntando si se desea suspender la simulación.

El programa también avisa si la torre se vacía, si este es el caso, la simulación se suspenderá.

TANQUE DE OSCILACIÓN		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: <input type="text"/>		Nuevo ELEMENTO	
Nombre <input type="text"/>		Tramo aguas arriba <input type="text"/>	
Desplante [msnm] <input type="text" value="0"/>		Tramo aguas abajo <input type="text"/>	
Área del tanque [m ²] <input type="text" value="0"/>			
Altura [m] <input type="text" value="0"/>			
Tubería de conexión <input checked="" type="checkbox"/>			
Longitud de la tubería de conexión pozo-conducción [m] <input type="text" value="0"/>			
Diámetro de la tubería de conexión pozo-conducción [m] <input type="text" value="0"/>			
Coeficiente de fricción de la tubería de conexión <input type="text" value="0"/>			
Graba		Consulta	
Inicializa		Baja	
		Salir	

Figura 4.27: Pantalla de ingreso de información para una torre de oscilación.

La información en los campos *Longitud de la tubería de conexión pozo-conducción [m]*, *Diámetro de la tubería de conexión pozo- conducción [m]* y *Coeficiente de fricción de la tubería de conexión* se ingresa si se tiene considerada una tubería de conexión, de lo contrario se desactiva la opción del campo *Tubería de conexión*. La tubería de conexión es una parte importante del arreglo de una torre de oscilación, siempre y cuando la torre de oscilación no se conecte de manera franca a la tubería principal, el arreglo de una torre de oscilación conectada a través de una tubería de conexión a la tubería principal se puede ver en la figura 3.1 del capítulo 3.

La velocidad del agua en la tubería de conexión se sugiere que sea menor que 3 m/s, Ref. 4..

4.2.3.4 Tanque unidireccional

Una vez que se selecciona la opción *Tanque unidireccional* del submenú *Elementos entre tramos*, aparecerá la pantalla mostrada en la figura 4.28.

TANQUE UNIDIRECCIONAL		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: <input type="text"/>		Nuevo ELEMENTO	
Nombre <input type="text"/>		Tramo aguas arriba <input type="text"/>	
Número de válvulas de retención <input type="text" value="0"/>		Tramo aguas abajo <input type="text"/>	
Coef. de pérdida de carga, válvulas de retención [s ² /m ⁵] <input type="text" value="0"/>		Coeficiente de pérdida de una válvula de llenado [s ² /m ⁵] <input type="text" value="0"/>	
Desplante del tanque [msnm] <input type="text" value="0"/>		Longitud de la tubería de conexión tanque-conducción [m] <input type="text" value="0"/>	
Área del tanque [m ²] <input type="text" value="0"/>		Diámetro de la tubería de conexión tanque-conducción [m] <input type="text" value="0"/>	
Tirante del agua en el tanque [m] <input type="text" value="0"/>		Bordo libre del agua [m] <input type="text" value="0"/>	
Número de válvulas de llenado <input type="text" value="0"/>			
Graba		Consulta	
Inicializa		Baja	
		Salir	

Figura 4.28: Pantalla de ingreso de información para un tanque unidireccional.

Además de los campos ya conocidos, se tienen los siguientes: *Número de válvulas de retención*, las cuales se consideran iguales; *Coef. de pérdida de carga, válvulas de retención* [s^2/m^5], este es el coeficiente de pérdida de carga K_V de la expresión 4.1.

$$\Delta H = K_V Q^2 \quad (4.1)$$

Donde:

ΔH es la pérdida de carga en la tubería de conexión, en m.

K_V es el coeficiente de pérdida de carga debido a la válvula, en s^2/m^5 .

Q es el gasto que circula por la tubería de conexión, en m^3/s .

La tubería de conexión es una parte importante en el arreglo de un tanque unidireccional, este se puede ver en la figura 3.7 del capítulo 3.

El *Desplante del tanque* [$msnm$]; el *Área del tanque* [m^2], para la cual se puede hacer un predimensionamiento con el método propuesto en el anexo 6 la Ref. 4; el *Tirante del agua en el tanque* [m], este es el que tiene el tanque en condiciones de operación en flujo establecido; el *Número de válvulas de llenado*, las cuáles se consideran iguales; el *Coeficiente de pérdida de una válvula de llenado* [s^2/m^5], el cual está incluido en la expresión 4.1; la *Longitud de la tubería de conexión tanque-conducción* [m]; el *Diámetro de la tubería de conexión tanque-conducción* [m] y el *Bordo libre del agua* [m]. Se sugiere que la velocidad del agua en la tubería de conexión sea menor que 4 m/s, Ref. 4.

4.2.3.5 VAEA

Cuando se elige la opción *VAEA*, en el submenú *Elementos entre tramos* en el menú de navegación, aparecerá la pantalla mostrada en la figura 4.29.

Figura 4.29: Pantalla de ingreso de información para una VAEA.

En la figura 4.29, además de los campos *Nombre*, *Tramo aguas arriba* y *Tramo aguas abajo*, se tienen los campos *Cota de la entrada del aire* [$msnm$], que es la elevación a la que se encuentra la entrada de aire; la *Presión atmosférica* [$msnm$], que corresponde a la presión

del lugar y el *Coficiente politrópico*, que corresponde a la ley de compresión adiabática y cuyo valor sugerido es de 1.2.

En TRANS, no se simula la expulsión de aire por parte de la VAEA, sino que se considera que el aire que ingresa permanece en el sitio en donde se ubica la VAEA.

En el programa se considera que el aire ingresa a la tubería cuando la carga piezométrica en donde se encuentra la VAEA es menor a la cota de la entrada del aire.

4.2.4 Maniobras entre tramos

En el menú de navegación, al elegir el submenú *Maniobras entre tramos*, se desplegarán las opciones de *Apertura / Cierre de una válvula* y *Paro súbito de bombeo*, estas se muestran en la figura 4.30.

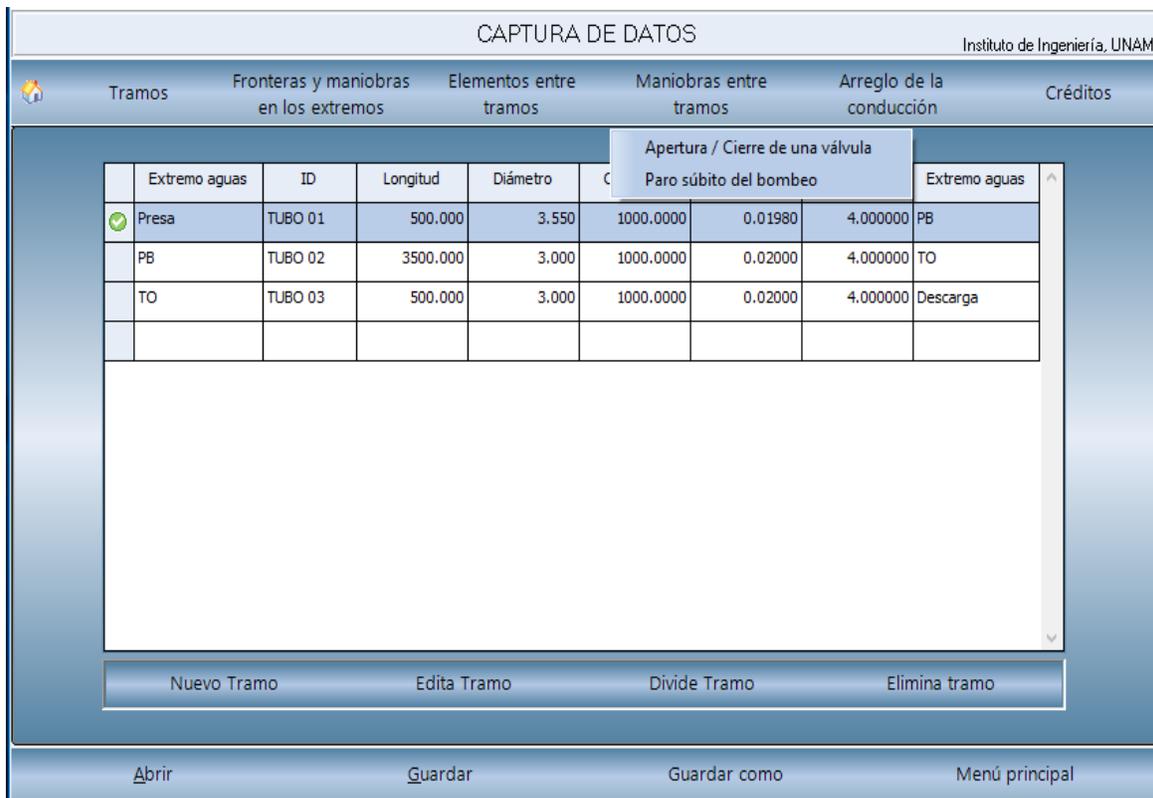


Figura 4.30: Submenú de maniobras entre tramos.

4.2.4.1 Apertura / Cierre de una válvula

Cuando se elige la opción *Apertura / Cierre de una válvula* del submenú de *Maniobras entre tramos* se mostrará la pantalla que se muestra en la figura 4.31.

Esta pantalla muestra los mismos campos para ingresar información que se muestran en la sección 4.2.2.3 (*Cierre de válvulas*) a excepción de que en este caso se considera también la apertura de la válvula en el campo *Tiempo de cierre / Apertura de la válvula [s]*, esto se elige en el campo *Maniobra*.

Además, debido a que la maniobra está entre tramos, se tienen los campos *Tramo aguas arriba* y *Tramo aguas abajo*.

Figura 4.31: Pantalla de ingreso de información para una Apertura / Cierre de válvulas.

4.2.4.2 Paro súbito del bombeo

Cuando se elige esta opción del submenú *Maniobras entre tramos*, se mostrará la pantalla de ingreso de información para un paro súbito de bombeo mostrada en la figura 4.32.

La pantalla de ingreso de información para un paro súbito de bombeo entre tramos es similar a la que se muestra en la sección 4.2.2.2 (*Paro súbito de bombeo*) con las excepciones indicadas a continuación.

En un paro súbito de bombeo entre tramos no se necesita proporcionar el instante en que inicia el disparo, ni la elevación del nivel de succión, así mismo, el cadenamamiento de la planta de bombeo está dado por la longitud de los tramos entre los que esta se encuentra, por lo que no es necesario indicar el cadenamamiento de la planta de bombeo.

En este tipo de maniobra, al estar entre dos tramos, se tienen los campos *Tramo aguas arriba* y *Tramo aguas abajo*.

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: Nuevo ELEMENTO

Nombre Tramo aguas arriba

Número de bombas Tramo aguas abajo

Tipo de válvulas en la descarga de las bombas:
 Válvula de control
 Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga:

Tiempo de cierre de las válvulas [s]

Instante en que inicia el cierre [s]

Posición de las válvulas a gasto establecido [°]

Posición de la válvula [°]:
 Abierta[0°]
 Cerrada[90°]

Coefficiente mínimo de pérdida [s^2/m^5]

Coefficientes del polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + \dots + a_6\tau^6$

a0 =

a1 =

a2 =

a3 =

a4 =

a5 =

a6 =

Datos bombas:

Ángulo máximo de las curvas fh y fβ
 $270 \leq \theta \leq 360$

Incremento angular entre puntos
 $1 \leq \Delta\theta \leq 10$

Gasto de diseño [m^3/s]

Carga de diseño [m]

Velocidad de diseño [rpm]

Eficiencia máxima
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [$kg \cdot m^2$]

$[N_s] = \frac{rpm \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$ Velocidad específica [N_s]
 (Opcional)

Captura datos curva fh

Captura datos curva fβ

Observaciones...

Figura 4.32: Pantalla de ingreso de información para un Paro súbito de bombeo (Maniobra entre tramos).

Los demás campos, como los *Coefficientes del polinomio*, el *Coefficiente mínimo de pérdida* [s^2/m^5] o los *Datos de las bombas* incluyendo las curvas fh y $f\beta$ se obtienen de la misma manera que lo presentado en la sección 4.2.2.2.

4.2.5 Arreglo de la conducción

Cuando se elige la opción *Arreglo de la conducción* del menú de navegación se mostrará una pantalla como la de la figura 4.33.

Esta contiene los elementos, maniobras y tramos dados de alta en el arreglo de la tubería, esta pantalla es únicamente informativa y no se puede modificar a menos que se agreguen o borren nuevos elementos, maniobras o tramos de la manera en como se ha visto en las secciones anteriores.

El término *N/A* indica que no hay nada en el *Tramo aguas arriba* o *Tramo aguas abajo*, como es el caso de los extremos del sistema.



Figura 4.33: Pantalla de Arreglo de la tubería.

Con lo visto anteriormente, se puede concluir que la manera más adecuada de construir el arreglo del sistema es primero comenzar con los tramos, para después colocarles las estructuras o maniobras en sus fronteras, de otro modo al momento de ingresar la información de las estructuras, no se tendría un tramo para agregar en los campos *Tramo aguas arriba* o *Tramo aguas abajo*.

4.3 Sistema de simulación de transitorios

Como se mencionó con anterioridad, para simular un transitorio en el programa TRANS se debe haber completado el archivo de datos y haber guardado el documento. El sistema de captura de datos creará dos documentos del mismo nombre con extensión trs y txt, este último es el que se usará para simular el transitorio.

Para esto, se debe ir al menú principal con la opción *Menú principal* de la figura 4.30, una vez hecho esto, se mostrará la ventana de la figura 4.1.

Se debe seleccionar la opción *Simula transitorio*, después de hacer esto, se mostrará el menú de la figura 4.34.

En este menú se debe seleccionar la ruta del documento con extensión txt que se desea simular en el campo *Archivo de datos*.

En el campo *Prefijo de archivos de resultados* se puede cambiar el nombre y la ruta de los archivos de resultados. Los archivos de resultados se crean después de simular el transitorio al elegir la opción *Calcula*.

Al momento de que el programa simula el transitorio, se pueden o no mostrar mensajes de error.

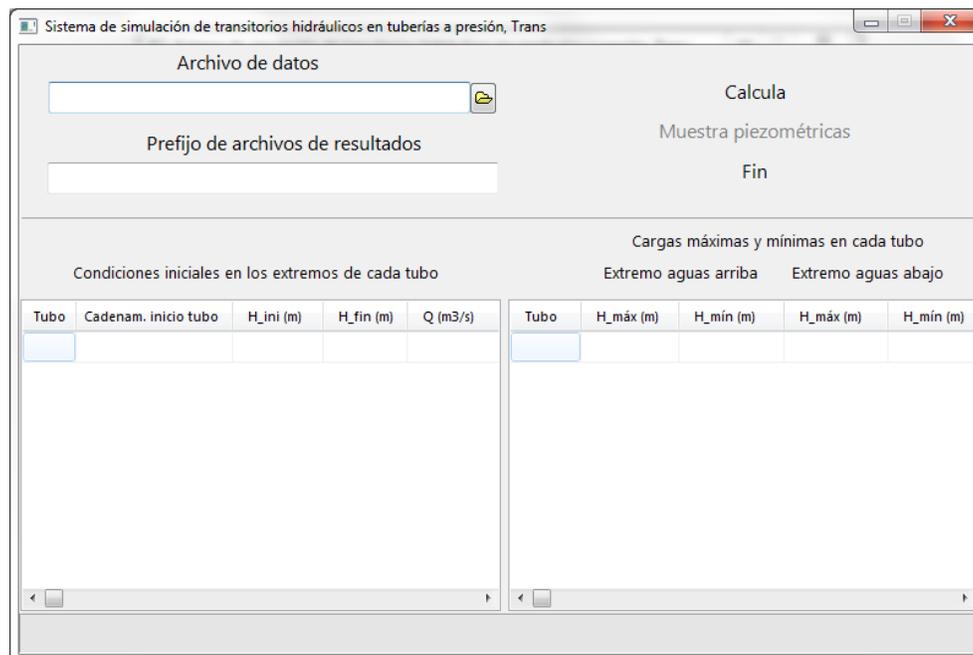


Figura 4.34: Menú para simular transitorio.

Si no se muestra un mensaje de error, se mostrará el mensaje de la figura 4.35.

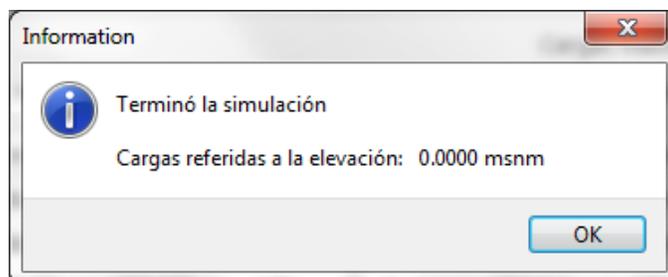


Figura 4.35: Mensaje de término de simulación.

Al término de la simulación, las columnas de nombres *Condiciones iniciales en los extremos de cada tubo* y *Cargas máximas y mínimas en cada tubo* de la figura 4.34, mostrarán las características del sistema en condiciones de operación y las características del sistema en flujo transitorio, respectivamente.

Si se desea ver las cargas mínimas y máximas que se presentan durante el transitorio de manera gráfica, se elige la opción *Muestra piezométricas*, al seleccionarse se mostrará la siguiente ventana (figura 4.36).

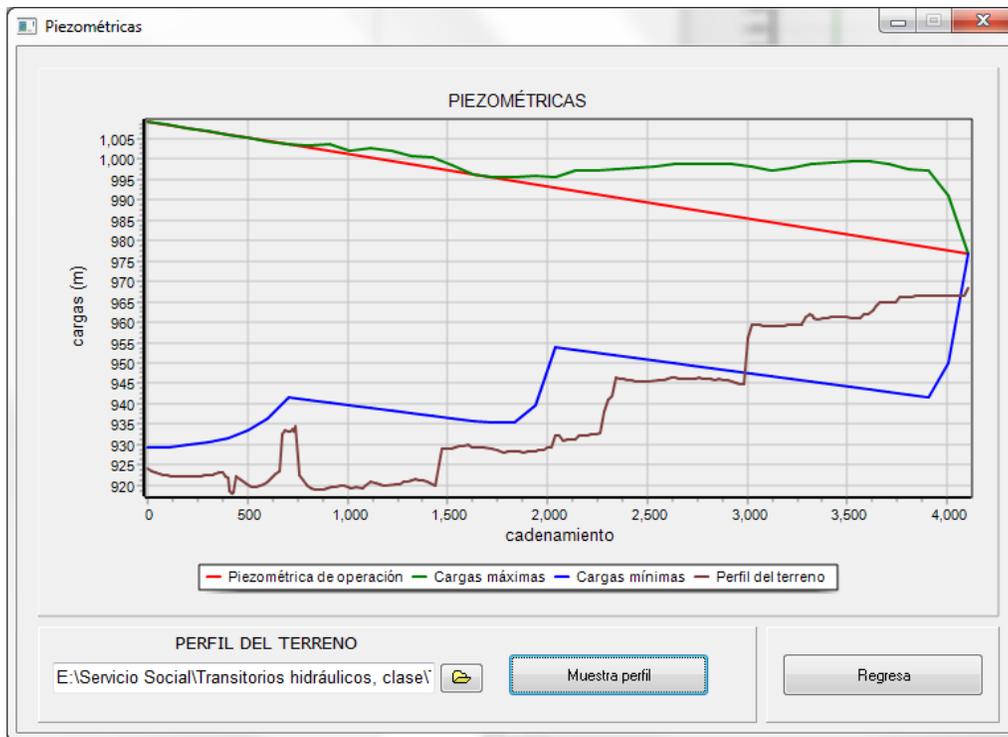


Figura 4.36: Piezométricas.

En una tubería es importante que no se presenten depresiones que puedan provocar un colapso de la misma, por lo que la línea de cargas mínimas no debe cortar al perfil del terreno.

El programa permite comparar las cargas mínimas y máximas con el perfil del terreno seleccionando la opción *Muestra perfil*. Para esto se debe tener la ruta del archivo que contiene los datos del perfil del terreno, estos datos deben estar acomodados por columnas en un archivo con extensión txt. La primera columna deberá representar el cadenamiento y la segunda la elevación. Se recomienda que los datos comiencen desde el primer renglón del documento.

En la figura 4.36 se muestra la piezométrica de operación en rojo, las cargas mínimas en azul, las máximas en verde y el perfil del terreno en café.

Después de que se ha simulado un transitorio, TRANS crea varios archivos de resultados con extensión csv, los cuales tienen los resultados de la simulación del transitorio y son los de interés al momento del diseño del sistema contra un transitorio. Estos archivos tienen el mismo nombre y se diferencian por su sufijo que indicará el tipo de información que contienen, estos son `_H`, `_HEX`, `_Q`, `_RPM_Z`. Además de estos anteriores, el programa genera un archivo de extensión txt, el cual tiene el sufijo `_IMP`.

Cabe mencionar que con cada simulación que se haga, el programa TRANS creará sus respectivos archivos de resultados.

4.3.1 Archivo de resultados _H

Este archivo contiene la información de la variación de la carga desde que inicia la simulación hasta que esta termina, por lo tanto, la carga varía en función del tiempo.

El programa registra la carga en los puntos importantes del arreglo y en los que el usuario elija, como lo pueden ser: el cárcamo de succión, la descarga, en un cambio de tramo, en la succión de una planta de bombeo, en la descarga de una planta de bombeo, en una estructura de control de transitorios, etc.

4.3.2 Archivo de resultados _HEX

Este archivo muestra las líneas de cargas piezométricas máximas, mínimas y de operación en función del cadenamamiento a lo largo de la tubería. Estos datos corresponden a lo mostrado en la figura 4.36.

4.3.3 Archivo de resultados _Q

En este archivo se muestra el gasto en función del tiempo en diferentes puntos como en el cárcamo de succión, la planta de bombeo o la descarga. Es aquí donde se puede revisar el gasto que entrega o recibe una torre de oscilación, tanque unidireccional o una cámara de aire.

El gasto se considera negativo cuando el agua entra a la estructura de control de transitorio y es positivo cuando esta aporta agua a la tubería.

4.3.4 Archivo de resultados _RPM_Z

En este archivo se muestra la información de la velocidad de giro de las bombas de las plantas de bombeo en función del tiempo. Es aquí donde se puede ver la velocidad que pueden alcanzar los equipos de bombeo al momento de que un transitorio se presenta.

También se pueden ver los niveles de agua dentro de las estructuras de control de transitorios como torres de oscilación, cámaras de aire y tanques unidireccionales.

4.3.4 Archivo de resultados _IMP

Este archivo se genera luego de la simulación aun cuando haya errores en esta, este contiene las características del sistema a flujo establecido, el tiempo de simulación y los datos de todas las estructuras que forman al sistema. Así como información del sistema en flujo transitorio.

Cuando hay algún error en la simulación, este se muestra al final del documento para saber en dónde se ha generado el error.

El tamaño de los archivos de resultados depende del tiempo de simulación que el usuario haya elegido, así como de la frecuencia de grabación. Estos pueden ser cambiados de la manera a como se mencionó en la sección 4.2.

Capítulo 5: Uso de TRANS para la ayuda en el diseño de dispositivos de control de transitorios

En este capítulo se presentan ejemplos prácticos que complementarán lo visto en el capítulo 4 sobre el uso del programa TRANS para la modelación de sistemas hidráulicos con tuberías a presión en los que se presenta un fenómeno transitorio producido por un paro súbito del bombeo.

Una aplicación importante de TRANS es como herramienta de apoyo para determinar dimensiones óptimas de los diferentes dispositivos de control de transitorios. Cada sección de este capítulo corresponderá a un tipo de dispositivo o estructura, como lo son la torre de oscilación, tanque unidireccional, cámara de aire y válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA), los cuales son los que TRANS, en su versión docencia, contempla.

Para cada sección se presentarán ejemplos en donde se remarcarán los beneficios del dispositivo usado, como se vio en el capítulo 3. Por lo tanto, se presentarán dos situaciones: cuando no hay dispositivo o estructura que controle el transitorio y cuando si la hay.

Además, se indicarán los aspectos más relevantes a revisar para cada caso (sistema hidráulico sin dispositivo y con dispositivo) esto para ejemplificar el proceso que se sigue para diseñar los diferentes dispositivos de control de transitorios en un sistema hidráulico a presión.

El flujo transitorio de los ejemplos que se presentan en este capítulo es producido por el paro súbito de bombas, ya que, al ser los equipos de bombeo los elementos más complejos de simular, debido a la información que se necesita para representarlos numéricamente, ilustran de una mejor manera el uso del programa.

Cada dispositivo resuelve de manera diferente los problemas que se presentan en un acueducto debido a los transitorios, por lo que el usuario deberá elegir la mejor opción en cuanto a diseño y costo. Sin embargo, el presente trabajo no tiene como objetivo el elegir la mejor opción para cada ejemplo, si no solamente el mostrar el uso del programa.

5.1 Ejemplo de un sistema con torre de oscilación

En el capítulo 3 se explicaron los beneficios de usar una torre de oscilación en un sistema de bombeo, para el siguiente ejemplo se tendrán dos casos, el primero será sin torre y el segundo con la torre.

En la figura 5.1 se muestra un sistema de bombeo a través del cual se transporta agua del tanque de succión al tanque de descarga, para vencer la carga estática el agua se bombea en la planta de bombeo. El transitorio se produce por el paro súbito del bombeo.

El sistema será representado en el programa TRANS como se muestra más adelante.

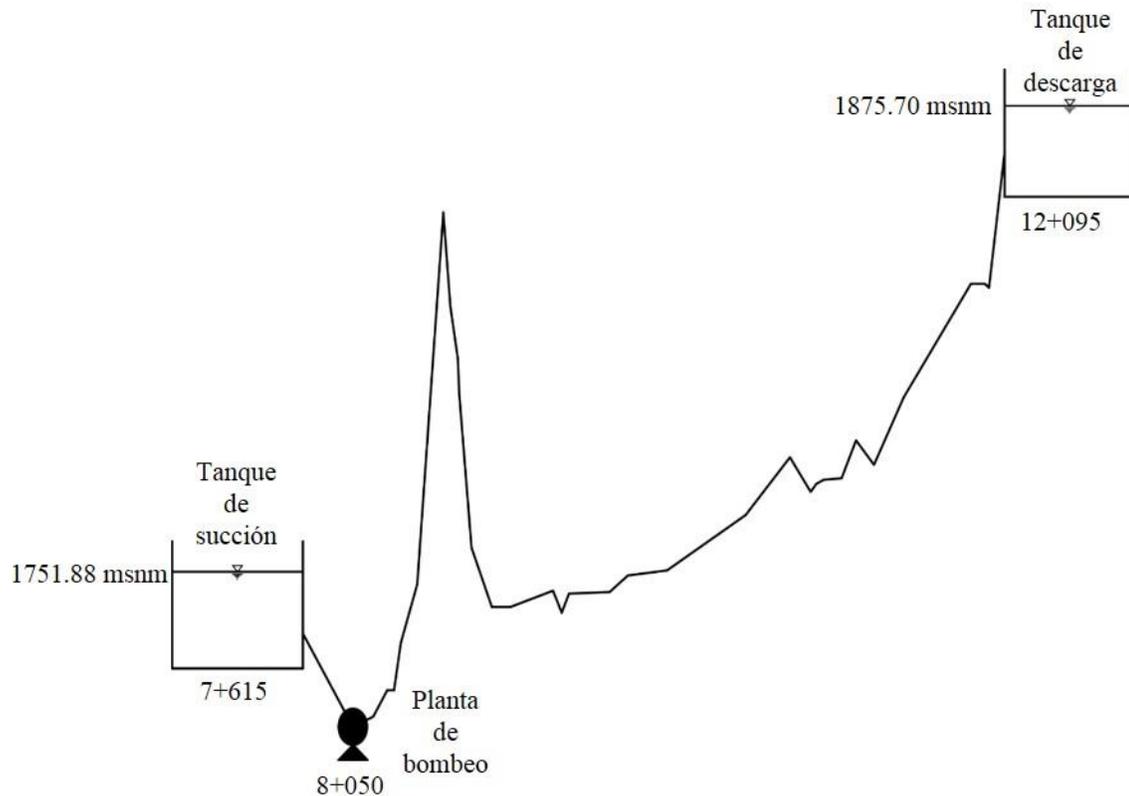


Figura 5.1: Esquema de sistema de bombeo sin dispositivo contra transitorio.

En el esquema de la figura 5.1 se muestran las elevaciones del agua en el tanque de succión y de descarga, las cuales son 1751.88 msnm y 1875.70 msnm, respectivamente. La línea de conducción sigue el perfil topográfico que se muestra en el esquema.

El tanque de succión se encuentra en el cadenamiento 7+615, la planta de bombeo (PB) en el 8+050 y el tanque de descarga en el 12+095. Además de lo anterior, en la tabla 5.1 se muestran las características de la tubería y del sistema, y en la tabla 5.2 se muestran las características del equipo de bombeo previamente seleccionado.

Tabla 5.1: Propiedades de la tubería del sistema.

Tramo	Longitud l (m)	Diámetro D (m)	Coef. fricción f (D-W)	Área A (m ²)	Celeridad c (m/s)	Cota H Succión (m)	Cota H Descarga (m)	Carga estática H_E (m)
Succión-PB (Tramo de succión)	435	2.9	0.014	6.605	1000	1751.88	1875.70	123.82
PB-Descarga (Tramo de descarga)	4045	3.1	0.014	7.547	1000			

Tabla 5.2: Datos del equipo de bombeo para el punto de máxima eficiencia.

Gasto de operación Q_{op} (m3/s)	Gasto unitario Q_u (m3/s)	Gasto de diseño Q_R (m3/s)	Carga de diseño H_R (m)	Velocidad de giro de diseño N_R (rpm)	Eficiencia máxima $\eta_{m\acute{a}x}$	Doble succi3n y un paso
4	4	4	124	1196	0.98	

El t3rmino Q_{op} se refiere al gasto de operaci3n que hay en el sistema, Q_u es el gasto unitario por bomba, en este caso el sistema contar3 con un solo equipo de bombeo. Los t3rminos Q_R , H_R y N_R se refieren al gasto, carga y velocidad de giro, respectivamente, para el punto de mayor eficiencia, la cual es de 98%.

Cabe aclarar que estos valores se obtienen de un an3lisis previo de la curva del sistema y la curva de la bomba, esto se puede consultar en la Ref. 2.

En este sistema se presenta un paro s3bito del bombeo debido al corte de energ3a el3ctrica, para lo cual se debe dise1ar una torre de oscilaci3n que contrarreste los efectos del transitorio que se presenta en el sistema.

El arreglo del sistema queda representado de la siguiente manera (figura 5.2) en el programa TRANS.

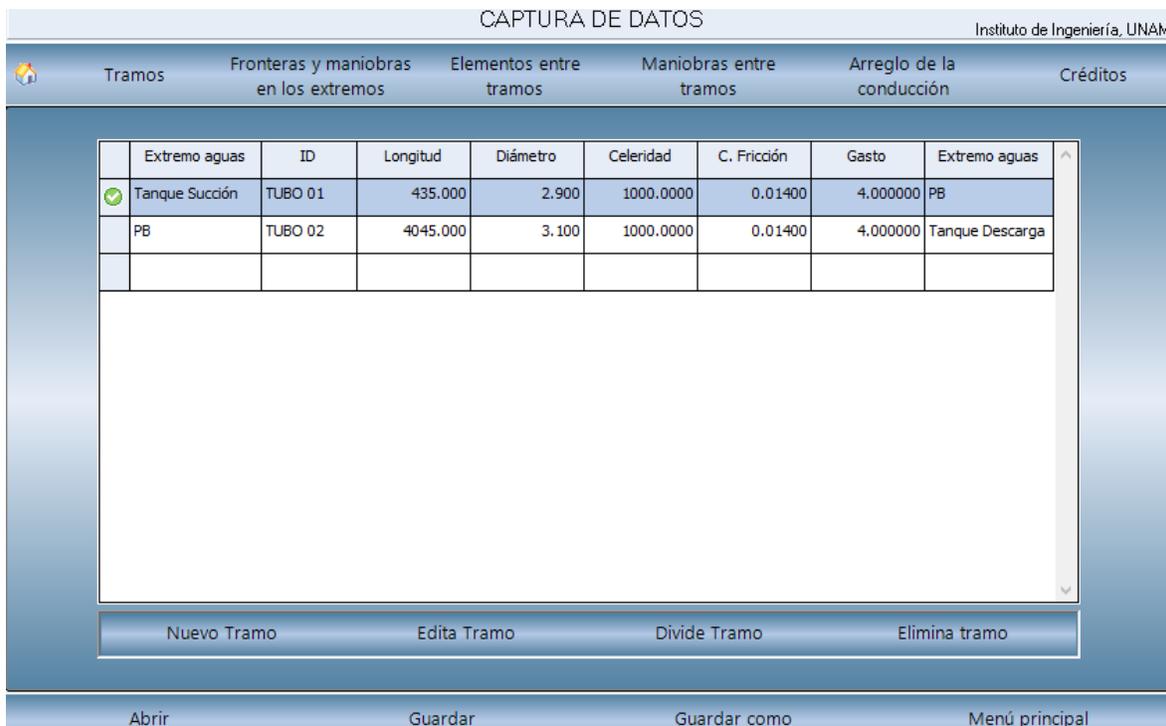


Figura 5.2: Arreglo del sistema sin torre de oscilaci3n representado en el programa TRANS.

El tramo que va desde el tanque de succión hasta la planta de bombeo (tramo de succión) queda identificado con el nombre de *TUBO 01* y las fronteras aguas arriba y aguas abajo son un tanque de carga constante (*Tanque Succión*) y la planta de bombeo (*PB*), respectivamente.

El tramo desde la planta de bombeo hasta el tanque de descarga (tramo de descarga) queda identificado como *TUBO 02* y sus fronteras aguas arriba y aguas abajo son la planta de bombeo (*PB*) y el tanque de carga constante (*Tanque descarga*), respectivamente.

Dado que la planta de bombeo queda entre los tramos de succión y de descarga, lo que se tendrá es una maniobra entre tramos y como se trata de un paro súbito de bombeo, la información correspondiente a la bomba deberá ingresarse en la ventana de la figura 5.3.

Figura 5.3: Ventana para ingresar la información del paro súbito de bombeo.

En la figura 5.3, la información que se muestra es la correspondiente al ejemplo, en donde la planta de bombeo *PB* se encuentra entre los tubos 01 y 02, en la cual se considera un solo equipo de bombeo, válvulas de control, un tiempo de cierre de 10 segundos y el instante en

que se inicia el cierre igual a cero. La posición de las válvulas a gasto establecido se considera de cero, es decir, totalmente abierta.

El coeficiente mínimo de pérdida, así como los coeficientes del 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 obtienen de acuerdo al procedimiento mostrado en el anexo A1 de la Ref. 3. Los resultados del cálculo hecho con tal procedimiento se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Valores de los coeficientes del polinomio y del coeficiente mínimo de pérdida.

Coeficiente mínimo de pérdida $k_{\min} (s^2/m^5)$	0.002025
a0	4.2128
a1	-0.7117
a2	-47.477
a3	196.23
a4	-354.19
a5	299.21
a6	-97.287

La operación de la bomba en flujo transitorio quedará representada por las curvas características de carga fh y momento $f\beta$. Como en la descarga de la bomba hay una válvula de control, el ángulo máximo de las curvas debe estar en el intervalo $270 \leq \theta \leq 360$ para este ejemplo será de 270° y el incremento angular de 5° .

El gasto, la carga y la velocidad de diseño, así como la eficiencia máxima son los presentados en la tabla 5.2. Con base en estos se calcula la velocidad específica N_S con la ecuación (5.1).

$$N_S = N_R \frac{\sqrt{Q_R/m}}{(H_R/n)^{3/4}} \quad (5.1)$$

Donde:

Q_R es el gasto para la operación de máxima eficiencia de la bomba, en m^3/s .

H_R es la carga de operación para la máxima eficiencia, en m.

N_R es la velocidad de diseño de la bomba, en m.

n es el tipo de succión de la bomba, esta puede ser sencilla o doble, en cuyos casos n valdrá 1 y 2, respectivamente.

m es el número de impulsores.

N_S es la velocidad específica de la bomba.

La velocidad específica resultante es de $N_S = 45.52$.

Para simular la operación de la bomba en flujo transitorio, se tomó la información correspondiente a las curvas de carga y momento para la velocidad específica $N_S = 46$, (ya

que este valor es cercano a 45.52) ésta se indica en la tabla 5.4 que se presenta en el anexo A2 de la Ref. 3.

Tabla 5.4: Curvas f_h y f_β para una velocidad específica $N_s = 46$

θ	f_h	f_β
0	-0.530	-0.350
5	-0.476	-0.265
10	-0.392	-0.180
15	-0.291	-0.062
20	-0.150	0.037
25	-0.037	0.135
30	0.075	0.228
35	0.200	0.320
40	0.320	0.410
45	0.500	0.500
50	0.650	0.555
55	0.810	0.604
60	0.930	0.625
65	1.050	0.640
70	1.170	0.643
75	1.250	0.645
80	1.330	0.640
85	1.370	0.630
90	1.410	0.620
95	1.420	0.635
100	1.440	0.690
105	1.445	0.760
110	1.450	0.820
115	1.440	0.890
120	1.420	0.960
125	1.400	1.020
130	1.350	1.080
135	1.310	1.143
140	1.245	1.180
145	1.180	1.178
150	1.100	1.165
155	1.030	1.140
160	0.940	1.110
165	0.850	1.070
170	0.750	1.030
175	0.700	0.990
180	0.667	0.950
185	0.665	0.910
190	0.660	0.860
195	0.650	0.810
200	0.630	0.750
205	0.600	0.670
210	0.550	0.600
215	0.510	0.500
220	0.480	0.400
225	0.460	0.300

230	0.470	0.190
235	0.490	0.100
240	0.530	0.010
245	0.570	-0.090
250	0.620	-0.200
255	0.660	-0.320
260	0.690	-0.450
265	0.715	-0.575
270	0.740	-0.700

$$[N_s] = (\text{rpm} \sqrt{m^3/s}) / (m^{0.75})$$

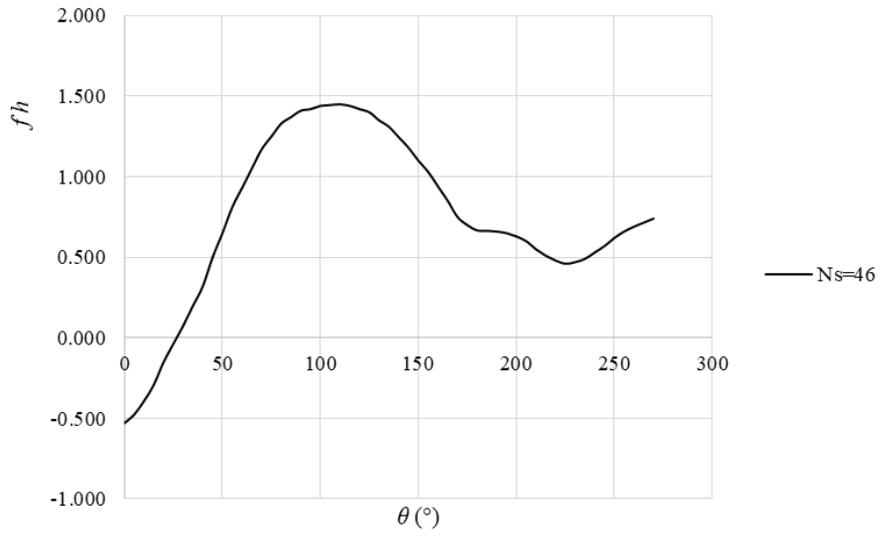


Figura 5.4: Comparación de curvas de carga f_h entre velocidades específicas de 45.52 y 46.

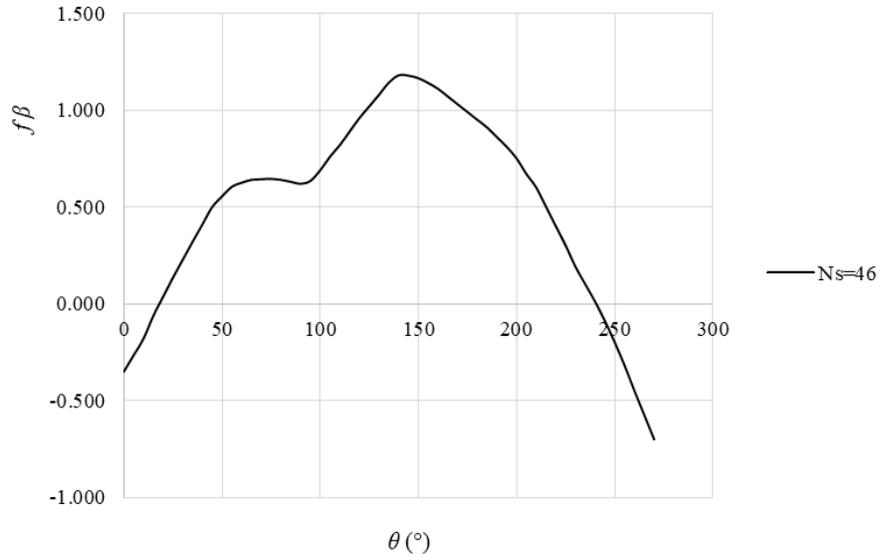


Figura 5.5: Comparación de curvas de momento $f\beta$ entre velocidades específicas de 45.52 y 46.

Una vez dada de alta la información de la planta de bombeo, se guardará el archivo. El tiempo de simulación, de acuerdo a la ecuación 4.1 sería de 90 segundos aproximadamente, sin embargo, para este ejemplo se utilizará de 360 segundos (figura 5.6) ya que este tiempo permite que se pueda visualizar una mayor cantidad de datos en la simulación. La frecuencia de grabación de resultados será de 1 (Figura 5.7).

TIEMPO DE SIMULACIÓN

Tiempo de simulación [s]

Aceptar

Figura 5.6: Tiempo de simulación.

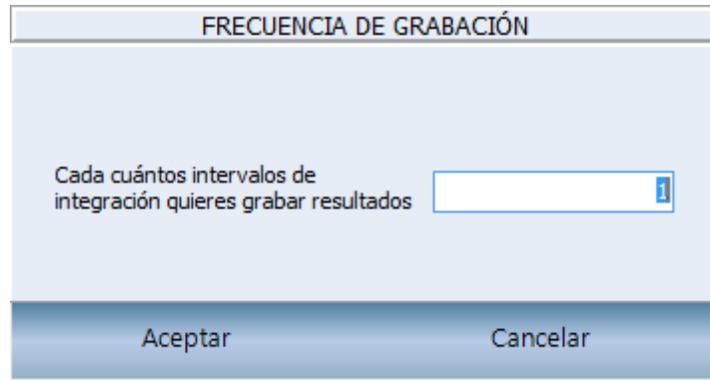


Figura 5.7: Frecuencia de grabación.

Caso 1: sistema sin torre de oscilación

Para este caso sin torre de oscilación, una vez guardado el archivo, se procede a simular el transitorio, creándose sus archivos de resultados correspondientes (_HEX.csv, _H.csv, _Q.csv, _RPM_Z.csv) como se vio en el capítulo 4.

Lo primero que se sugiere revisar es las cargas piezométricas del sistema, las cuales se podrán ver si se indica al programa que se muestren las piezométricas y se asigna el archivo correspondiente al perfil del terreno con extensión txt para el ejemplo, como se indicó en la sección 4.3 del capítulo 4. O bien, si se grafica la información contenida en el archivo con terminación _HEX.csv.

Dicha información se puede ver en la figura 5.8, en la cual se muestran las cargas piezométricas máximas ($H_{máx.}$), mínimas ($H_{mín.}$) y de operación ($H_{op. est.}$), en m.c.a. en función del cadenamiento, en m. En esta figura se presenta una parte de la información que contiene dicho archivo.

Cadenam. (Tanque Succión)	H (máx)	H (mín)	Cadenam. (Tanque Succión)	H (op. est.)
7615	1751.88	1751.88	7615	1751.88
7723.75	1779.426	1724.29	8050	1751.841
7832.5	1779.683	1724.036	8050	1875.809
7941.25	1780.47	1723.252	12095	1875.548
8050	1781.685	1722.04		
8050	1983.72	1768.488		
8159.32	1983.657	1768.573		
8268.65	1983.479	1768.751		
8377.97	1983.19	1769.025		
8487.3	1982.786	1769.409		
8596.62	1982.254	1769.899		
8705.95	1981.659	1770.36		
8815.27	1980.937	1771.074		
8924.59	1980.047	1771.952		

Figura 5.8: Información contenida en el archivo de resultados con terminación _HEX.csv para el ejemplo sin torre de oscilación.

Las cargas piezométricas correspondientes a la información contenida en el archivo de resultados con terminación _HEX.csv son graficadas en la figura 5.9.

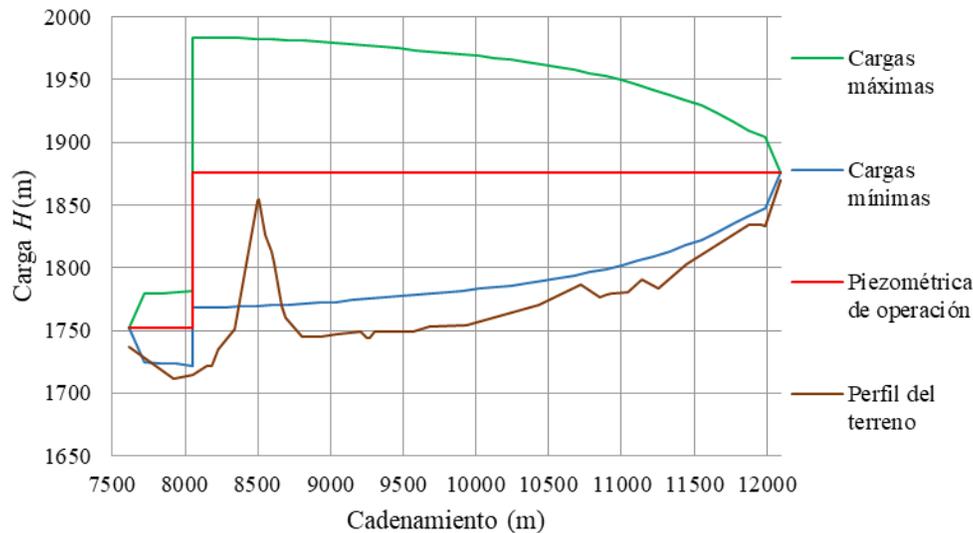


Figura 5.9: Piezométricas sin torre de oscilación.

En esta figura se observa que la línea de cargas mínimas (en azul) cruza con el perfil del terreno (en café) en algunos puntos, por ejemplo, en el más alto de la topografía y en el tramo de succión antes de la planta de bombeo. Esto hará que se presenten depresiones no deseadas en estos puntos de la tubería.

Por otra parte, las sobrepresiones que se presentan en la descarga de la bomba son de 1983.72 mca, el cual es un valor muy grande con respecto a la carga de presión que hay en flujo establecido en ese punto, que es de 1875.8 mca.

A los 12000 metros se puede ver que las sobrepresiones son menores que en la descarga de las bombas, estas sobrepresiones llegan a los 1904.1 mca, sin embargo, este valor sigue siendo mayor al que alcanza la piezométrica de operación en ese punto, que es de 1875.5 mca.

Por lo que se podría concluir que en prácticamente toda la tubería las sobrepresiones llegan a valores muy altos en comparación a la piezométrica de operación, por lo que la tubería queda expuesta a problemas de falla por sobrepresión, requiriéndose tubería de alta resistencia en prácticamente todo el sistema.

Otro aspecto que se recomienda revisar es la velocidad de giro en sentido inverso que el equipo de bombeo debe soportar, ya que aquí se puede ver si el equipo gira en sentido contrario y si es así, cuál es la magnitud de tal giro. Si el equipo soporta una determinada velocidad de giro inverso y en el sistema se rebasa tal especificación, este puede dañarse. Por lo que este aspecto es importante de revisar al momento de hacer una simulación.

A partir del archivo de resultados con terminación `_RPM_Z.csv` se puede hacer la gráfica de la figura 5.10, la cual muestra la velocidad de giro del equipo de bombeo y como esta varía cuando se presenta el transitorio.

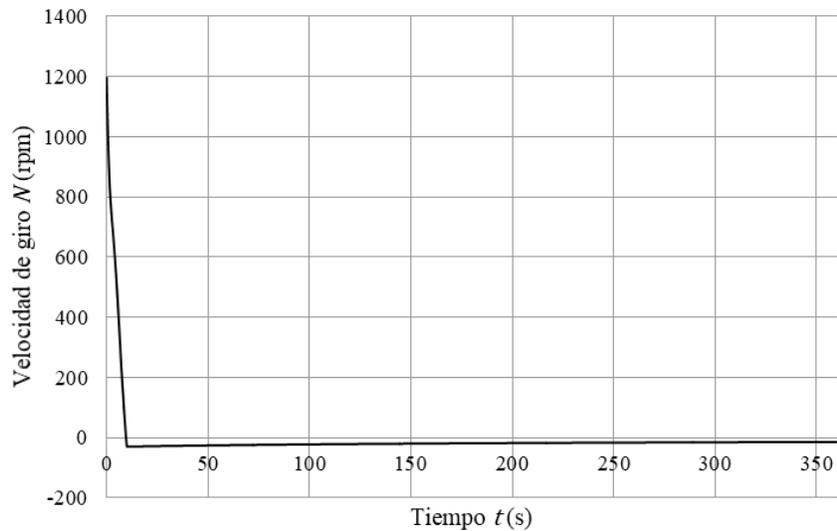


Figura 5.10: Velocidad de giro sin torre de oscilación.

Se puede ver en la figura 5.10 que la velocidad de giro en sentido contrario no llega a ser muy grande, por lo que el equipo estaría a salvo de daños si los valores de la velocidad de giro en sentido inverso están por debajo de lo que se especifica para el equipo.

Cabe señalar que la velocidad de giro en sentido inverso que puede alcanzar el equipo de bombeo se relaciona directamente con el tiempo de cierre de la válvula, por lo cual, si se desea cambiar la velocidad de giro en sentido inverso que el equipo presentará durante el transitorio, se puede cambiar el tiempo de cierre de la válvula.

Se explicará el contenido de los archivos de resultados con terminación `_H.csv` y `_Q.csv`, aunque hay que aclarar que lo más importante a revisar, para este caso en el que no se cuenta con la torre de oscilación, son las piezométricas y la velocidad de giro.

Si se abre el archivo de resultados con terminación `_H.csv` se tendrá información como la de la figura 5.11.

Tiempo	H(Tanque Succión)	H(succión PB)	H(descarga PB)	H (Tanque Descarga)
0	1751.88	1751.841	1875.809	1875.548
0.109	1751.88	1755.036	1872.998	1875.548
0.217	1751.88	1757.986	1870.403	1875.548
0.326	1751.88	1760.716	1868.001	1875.548
0.435	1751.88	1763.248	1865.774	1875.548
0.544	1751.88	1765.602	1863.704	1875.548
0.652	1751.88	1767.794	1861.775	1875.548
0.761	1751.88	1769.84	1859.976	1875.548
0.87	1751.88	1771.753	1858.293	1875.548
0.979	1751.88	1769.244	1854.884	1875.548
1.087	1751.88	1766.963	1851.706	1875.548
1.196	1751.88	1765.24	1848.424	1875.548
1.305	1751.88	1764.002	1845.063	1875.548
1.414	1751.88	1762.752	1842.025	1875.548
1.522	1751.88	1761.49	1839.281	1875.548
1.631	1751.88	1760.217	1836.804	1875.548
1.74	1751.88	1759.042	1834.475	1875.548
1.849	1751.88	1759.512	1832.861	1875.548
1.957	1751.88	1759.859	1831.384	1875.548
2.066	1751.88	1759.705	1829.754	1875.548

Figura 5.11: Información contenida en el archivo de resultados con terminación *_H.csv* cuando no hay torre de oscilación.

En esta figura se muestran las columnas con los nombres *Tiempo*, en s; carga en el tanque de succión (*H Tanque succión*); carga en la succión de la bomba (*H succión PB*); carga en la descarga de la bomba (*H descarga PB*), así como la carga en el tanque de descarga (*H Tanque descarga*), todas estas en m.

El tiempo va desde $t = 0s$ hasta $t = 360s$, que es el tiempo de simulación del transitorio. El tiempo cero representa a las condiciones de flujo permanente. En este caso, la información mostrada en la figura va hasta $t = 2.066s$.

Se puede observar que la carga en los tanques de succión y de descarga no varía con el tiempo, esto es debido a la consideración hecha de que estos son tanques de carga constante.

La carga piezométrica en la descarga de la bomba disminuirá en un principio y después aumentará para luego repetir este ciclo (figura 5.12) hasta llegar al estado de reposo en donde el sistema se encuentra en equilibrio de nuevo. Esto es debido a la onda de presión que viajará de un lado a otro en la tubería.

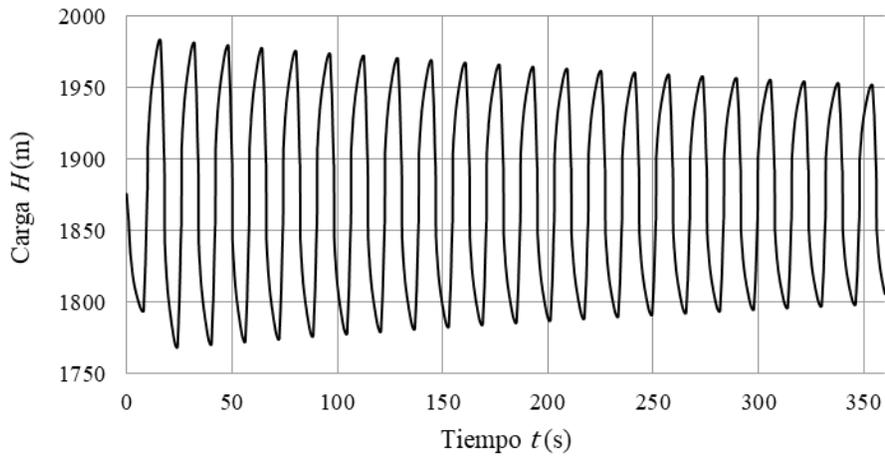


Figura 5.12: Variación de la carga en la descarga de la bomba sin torre de oscilación.

Si se abre el archivo con terminación `_Q.csv`, se mostrará el gasto en cada estructura que se haya dado de alta en TRANS en función del tiempo hasta $t = 360$ s. Si hay algún dispositivo de control de transitorios, se mostrará el gasto que este aporta o recibe de la tubería principal. Sin embargo, como en este caso no se tiene ningún dispositivo, solo se mostrará el gasto que entra y sale del tanque de succión (Q Tanque succión), el gasto que pasará por la bomba durante el transitorio (Q /bomba PB) y el gasto que entra o sale del tanque de descarga (Q Tanque descarga), todos estos en m^3/s . Dicho contenido se puede ver en la figura 5.13 hasta $t = 2.066$ s.

Tiempo	Q(Tanque Succión)	Q/bomba(PB)	Q (Tanque Descarga)
0	4	4	4
0.109	4	3.7929	4
0.217	4	3.6018	4
0.326	4	3.425	4
0.435	4	3.261	4
0.544	3.5861	3.1086	4
0.652	3.2041	2.9666	4
0.761	2.8506	2.8342	4
0.87	2.5228	2.7104	4
0.979	2.2181	2.4595	4
1.087	1.9343	2.2255	4
1.196	1.6695	1.984	4
1.305	1.4219	1.7365	4
1.414	1.3337	1.513	4
1.522	1.2477	1.3111	4
1.631	1.1179	1.1289	4
1.74	0.9507	0.9576	4
1.849	0.8083	0.839	4
1.957	0.6883	0.7305	4
2.066	0.5886	0.6107	4

Figura 5.13: Información contenida en el archivo de resultados con terminación *_Q.csv* cuando no hay torre de oscilación.

El gasto en la bomba tenderá a valores de cero (ver figura 5.14) debido a que se ha producido un paro en el bombeo, por lo que, en los primeros segundos del transitorio, el gasto irá disminuyendo hasta que parte del agua que se bombeó regrese (gasto negativo) hacia la planta de bombeo hasta que el gasto tienda a ser cero debido al cierre de las válvulas en la descarga.

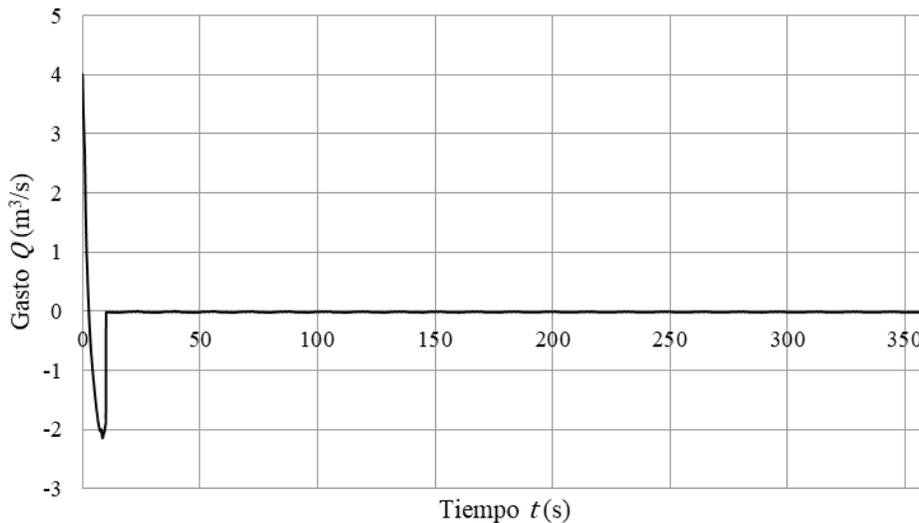


Figura 5.14: Variación del gasto en la descarga de la bomba cuando no hay torre de oscilación.

A partir de los archivos de resultados revisados (Cargas piezométricas y velocidad de giro), se hace evidente la necesidad de colocar una torre de oscilación en el sistema, para lo cual se tendría el caso 2.

Caso 2: Sistema con torre de oscilación

Si en el sistema mostrado en la figura 5.1 se coloca una torre de oscilación (TO) en el cadenamiento 8+495, el cual corresponde al punto más alto en la topografía del terreno como se muestra en la figura 5.15, esta ayudará a contrarrestar los efectos del transitorio que se presenta debido a un paro en los equipos de bombeo.

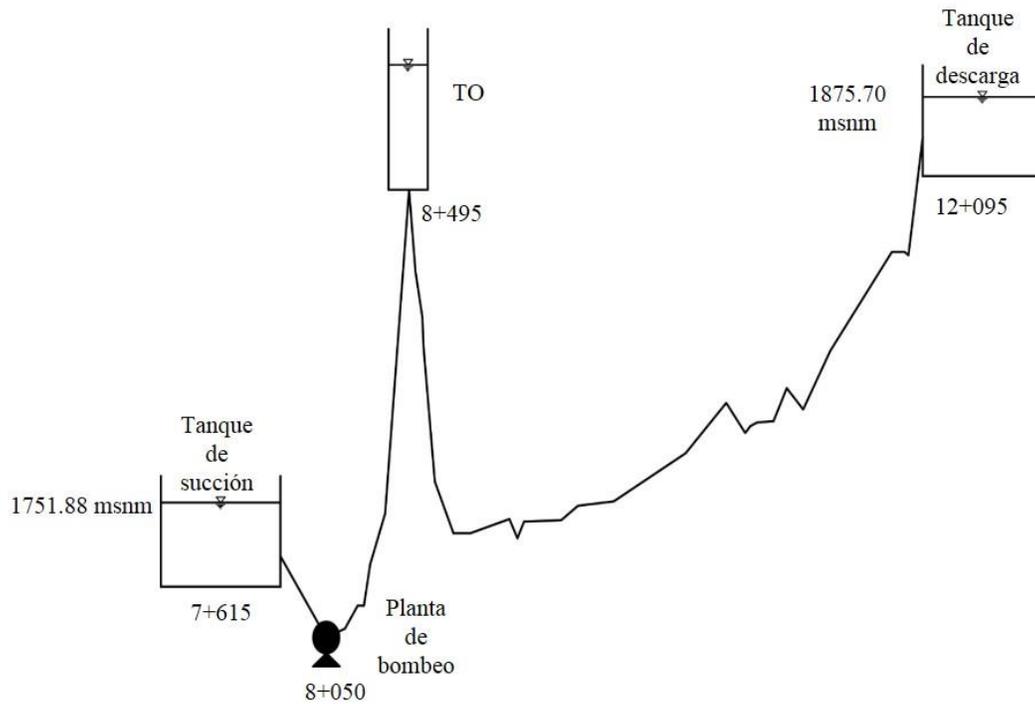


Figura 5.15: Esquema de sistema de bombeo con torre de oscilación.

En TRANS, el arreglo de las tuberías del sistema con la torre de oscilación queda representado como se muestra en la figura 5.16.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
	Tanque Succión	TUBO 01	435.000	2.900	1000.0000	0.01400	4.000000	PB	
	PB	TUBO 02	445.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	TO	
✓	TO	TUBO 03	3600.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	Tanque Descarga	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> Nuevo Tramo Edita Tramo Divide Tramo Elimina tramo </div>									

Figura 5.16: Representación del sistema con torre de oscilación en el programa TRANS.

Como se puede ver en la figura anterior, lo que antes comprendía el tramo desde la planta de bombeo (PB) hasta el tanque de descarga ahora ha sido dividido en dos tramos: el primero que va desde dicha planta de bombeo hasta la torre de oscilación (TO), el cual queda identificado como TUBO 02, y el otro que va desde la torre (TO) hasta el tanque de descarga, con el nombre de TUBO 03.

Debido a que se trabaja con el mismo sistema que en el caso 1, la información de las bombas es la misma, así como el tiempo de simulación y la frecuencia de grabación.

Para saber las dimensiones de la torre de oscilación, en un principio algunas de sus características como el área, se pueden calcular con el método presentado en el anexo 7 de la Ref. 4 y después de varias simulaciones en donde se verifican los archivos de resultados generados para cada simulación, de la manera en cómo se verá más adelante en el ejemplo, estas se van optimizando hasta llegar a ser las más adecuadas para resolver el problema.

Por lo tanto, lo que se presenta en la figura 5.17 son los valores optimizados del área y altura de la torre de oscilación.

TANQUE DE OSCILACIÓN Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: **TO** Edición de TO

Nombre:

Desplante [msnm]:

Área del tanque [m²]:

Altura [m]:

Tubería de conexión:

Tramo aguas arriba:

Tramo aguas abajo:

Longitud de la tubería de conexión pozo-conducción [m]:

Diámetro de la tubería de conexión pozo-conducción [m]:

Coefficiente de fricción de la tubería de conexión:

Figura 5.17: Características de la torre de oscilación.

La altura de la torre ha sido calculada a partir de varias simulaciones hechas hasta obtener la adecuada, revisando que el agua en esta no desborde.

El programa, al momento de calcular el transitorio, indica si con las dimensiones propuestas de la torre esta se vacía o si el agua desborda.

La variación del nivel del agua en la torre durante el transitorio se puede ver en el archivo de resultados con terminación `_RPM_Z`, csv. El desplante de la torre se obtiene del perfil del terreno.

No se ha considerado tubería de conexión por lo que la torre de oscilación está conectada de manera franca.

Las dimensiones de la torre de oscilación resultantes se muestran en la figura 5.18.

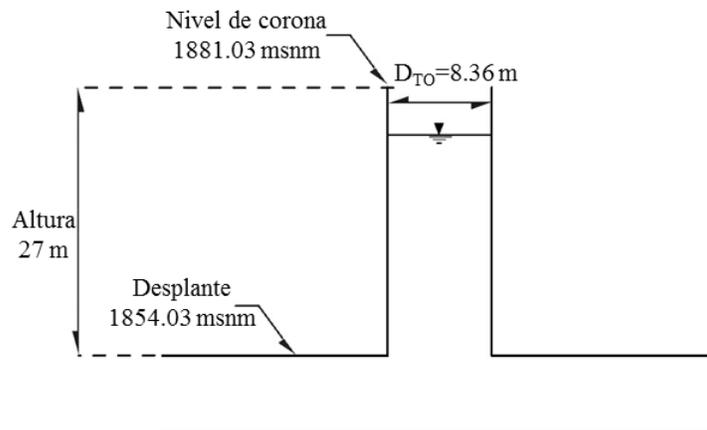


Figura 5.18: Dimensiones de la torre de oscilación.

Una vez dada de alta la torre de oscilación en el programa y guardado el archivo, se procede a simular el transitorio.

Después de que se ha hecho la simulación, el programa crea los archivos de resultados correspondientes, los cuales son importantes de analizar ya que la información contenida en cada archivo nos ayudará a poder optimizar las dimensiones de los dispositivos contra transitorios que hayamos considerado para el sistema en caso de que las dimensiones preliminares de estos dispositivos no solucionen el problema del transitorio, como se mencionó con anterioridad.

El primer aspecto que se recomienda revisar luego de la simulación hecha para el caso 2 en donde se tiene la torre de oscilación son las cargas piezométricas resultantes, estas se obtienen si se pide al programa que muestre las piezométricas, o bien, se grafica la información contenida en el archivo de resultados con terminación `_HEX.cvs`.

Este archivo permite ir optimizando aspectos como el área o la altura de la torre de oscilación para así obtener las dimensiones adecuadas de esta.

Como resultado de graficar la información del archivo de resultados mencionado, se tiene la gráfica de la figura 5.19.

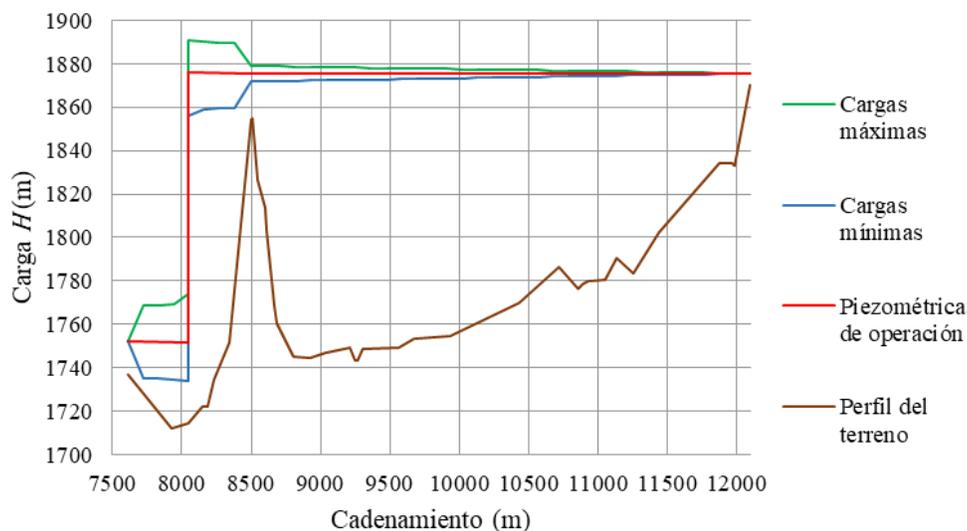


Figura 5.19: Piezométricas con Torre de oscilación.

Al momento de comparar la figura 5.9 con la 5.19 del caso 2, se puede observar que la presencia de una torre de oscilación en el sistema hace que las piezométricas aguas abajo de la torre de oscilación queden más pegadas a la piezométrica de operación.

En el caso de las cargas máximas, estas se reducen de manera considerable, mientras que para las cargas mínimas estas ya no cortan con el perfil del terreno en ningún punto por lo que se evitan depresiones en la tubería.

La torre de oscilación aísla el tramo desde ésta hasta la descarga de los efectos del transitorio rápido que se dan arriba de la torre.

Cabe señalar que la torre permite que los tramos en los que se necesitaría una tubería de alta resistencia sean pocos, a diferencia de cuando no hay torre.

Otro aspecto importante de revisar es la variación del nivel del agua en la torre de oscilación, ya que esta información nos dirá si la torre se vacía o desborda. Si bien, esto lo indica el programa al usuario al momento en que se realiza la simulación del transitorio, no está de más el poder interpretar la información que nos brinda el archivo de resultados correspondiente.

El archivo de resultados a revisar es el de terminación `_RPM_Z.csv`, el cual, a parte de brindarnos la información de la velocidad de giro del equipo, también nos brinda la variación del nivel del agua en la torre.

Si se grafica la información correspondiente al caso 2, se tendrá la gráfica mostrada en la figura 5.20.

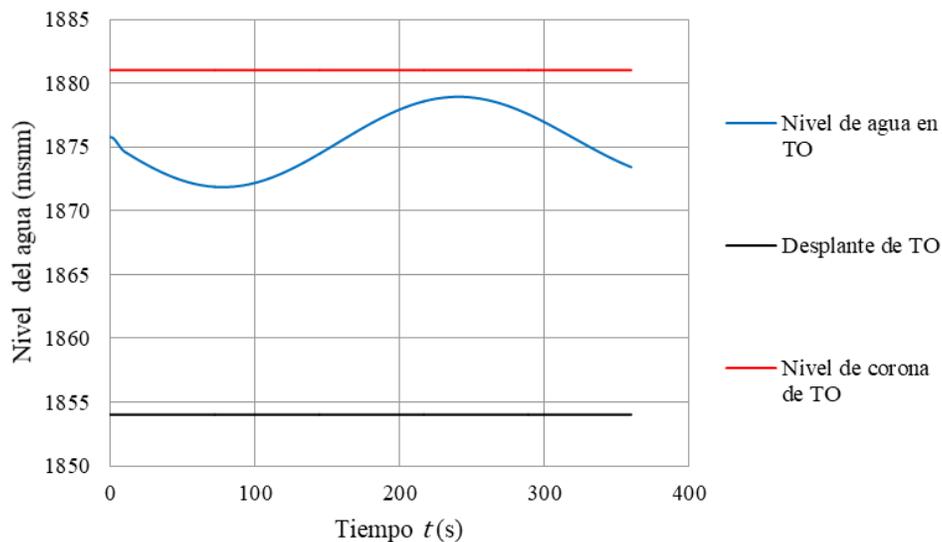


Figura 5.20: Variación del nivel del agua en la torre de oscilación.

En la figura 5.20, el nivel del agua dentro de la torre de oscilación nunca rebasa los límites del desplante de la torre ni el nivel de corona de esta, por lo que no desborda ni se vacía.

Cuando se tienen otras estructuras como una cámara de aire o un tanque unidireccional, este archivo nos brindará la variación del nivel del agua en dichas estructuras.

El gasto que el dispositivo contra transitorios aporta o recibe de la tubería principal es algo importante a tener en cuenta, ya que, en caso de tenerse una tubería de conexión, esta se puede diseñar con base en esta información, la cual viene en el archivo de resultados con terminación `_Q.csv`. Parte de la información contenida en este archivo puede verse en la figura 5.21.

Tiempo	Q(Tanque Succión)	Q/bomba(PB)	Q(TO)	Q (Tanque Descarga)
0	4	4	0	4
0.109	4	3.7939	0	4
0.217	4	3.6037	0	4
0.326	4	3.4277	0	4
0.435	4	3.2646	0	4
0.544	3.5881	3.113	0.4119	4
0.652	3.2079	2.9718	0.7919	4
0.761	2.8562	2.84	1.1433	4
0.87	2.53	2.7169	1.4691	4
0.979	2.2269	2.3461	1.7717	4
1.087	1.9446	1.9619	2.0534	4

Figura 5.21: Información contenida en el archivo de resultados con terminación $_Q$ para el ejemplo con torre de oscilación.

La información que se muestra en la figura 5.21 es hasta $t = 1.087s$, sin embargo, no se debe olvidar que la simulación fue hecha hasta $t = 360s$.

Al igual que en el caso 1, la velocidad de giro en sentido inverso que el equipo de bombeo debe soportar debe ser revisada, ya que esta puede cambiar debido a la presencia de una torre de oscilación como se puede ver en la figura 5.22.

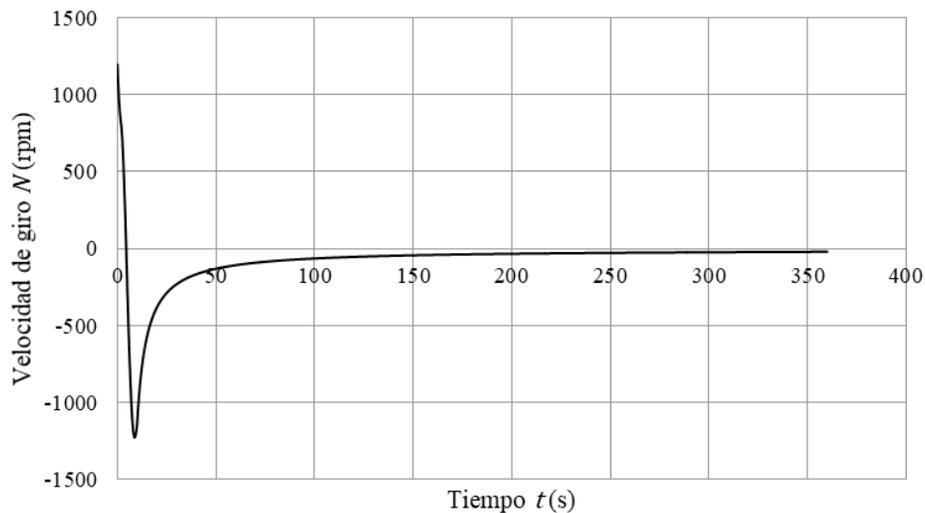


Figura 5.22: Velocidad de giro con torre de oscilación.

La figura 5.22 muestra una diferencia entre el caso 1 y el caso 2, en donde la velocidad en sentido inverso alcanza valores considerables cuando se coloca una torre de oscilación, esto puede provocar daños en el equipo de bombeo si se rebasa las especificaciones de este.

Por lo tanto, se deben revisar las características del equipo de bombeo para verificar que este resiste dichas velocidades en sentido inverso.

De no ser así, se puede cambiar el tiempo de cierre de las válvulas en la descarga de la bomba o proponer otro tipo de equipo.

Para el ejemplo de la torre de oscilación se puede concluir que una torre de oscilación puede resolver el problema de las piezométricas sin embargo, la velocidad de giro en sentido inverso que alcanza el equipo es un factor importante a considerar y esto puede hacer que se tenga que considerar el cambiar las dimensiones de la torre o incluso considerar otro tipo de estructura para control de transitorios. Sin embargo, como se mencionó al inicio, el presente trabajo no pretende brindar la solución óptima de ningún ejemplo, si no solo explicar el funcionamiento del programa.

5.2 Ejemplo de un sistema con un tanque unidireccional

Para ejemplificar el uso del programa TRANS en el diseño de un tanque unidireccional se presentará el siguiente ejemplo, el cual consiste en un sistema de bombeo con las mismas características presentadas para el ejemplo de la sección 5.1, a excepción de un cambio en la topografía que sigue la tubería. Dicho sistema se presenta en el esquema de la figura 5.23.

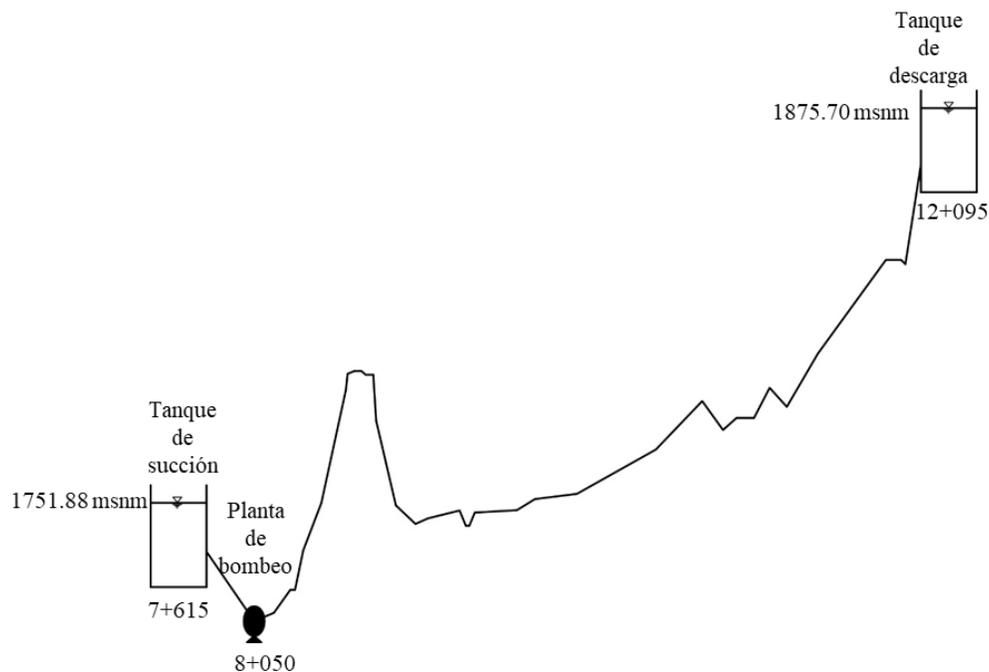


Figura 5.23: Esquema de sistema de bombeo sin dispositivo contra transitorio.

Caso 1: Sin tanque unidireccional

Suponiendo que en el sistema ocurra un paro súbito del bombeo y que no hay presencia de algún dispositivo que controle el transitorio que se presentará debido al paro del equipo de bombeo, se procederá a modelar el sistema en TRANS.

Como se mencionó anteriormente, la única diferencia entre el sistema del presente ejemplo y el anterior es la topografía, por lo que, tanto la información que se presenta en las tablas 5.1 y 5.2 como la de la planta de bombeo también aplica para este ejemplo.

El sistema queda representado en TRANS de la misma manera en que se muestra en la figura 5.2 de la sección anterior, a pesar de que la topografía del ejemplo es diferente aproximadamente en el cadenamiento 8500. Por lo que, los resultados que se obtuvieron en la simulación del transitorio de la sección 5.1 para el caso sin torre de oscilación son los mismos que para este ejemplo sin tanque unidireccional.

Cabe mencionar que, a la hora de la simulación, el programa TRANS no toma en cuenta la topografía que sigue la tubería, ya que una vez que se ha hecho la simulación, la topografía se puede añadir a los resultados que muestra el programa como se vio en la sección 4.3 del capítulo 4.

Una vez guardado el archivo, se procederá a simular el transitorio.

El primer aspecto a revisar es el de las cargas piezométricas, las cuales serán comparadas con la nueva topografía del terreno que sigue la tubería.

A partir del archivo de resultados _HEX.csv o bien, de indicarle al programa que muestre las piezométricas, asignando el archivo correspondiente al perfil del terreno para el ejemplo, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 5.24.

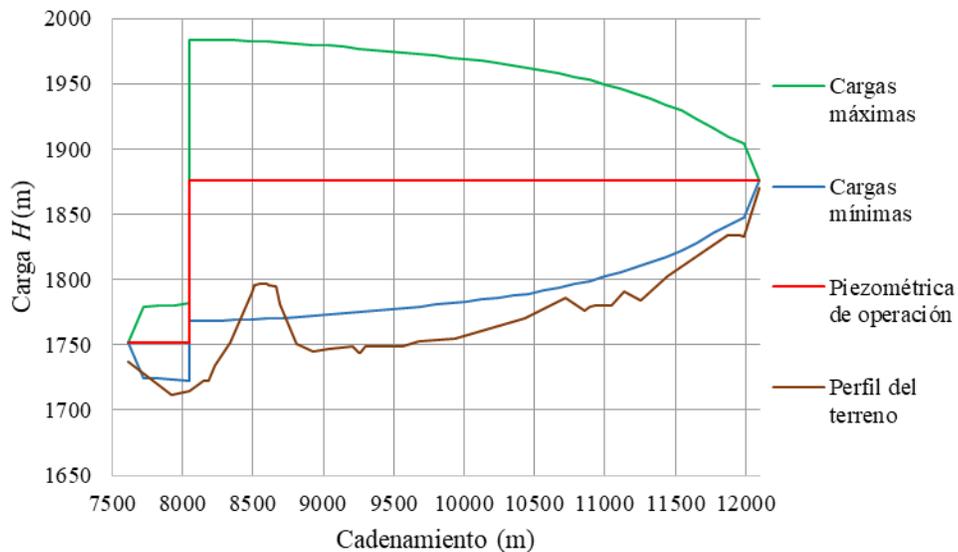


Figura 5.24: Piezométricas sin tanque unidireccional.

En esta imagen se puede apreciar un corte de la línea de cargas mínimas con el perfil del terreno en el tramo de succión y en el de descarga, además de que el transitorio afecta con sobrepresiones de gran magnitud a toda la tubería.

La información correspondiente a la velocidad de giro del equipo de bombeo en este ejemplo es igual a la de la figura 5.10 del caso 1 en la sección anterior, ya que no se ha modificado la información correspondiente al paro súbito de bombeo.

Caso 2: Con tanque unidireccional

Para ayudar a contrarrestar los efectos que tiene el transitorio en el sistema en el caso 1, se colocará un tanque unidireccional (*TU*) en el cadenamiento 8+509 como se muestra en el esquema de la figura 5.25.

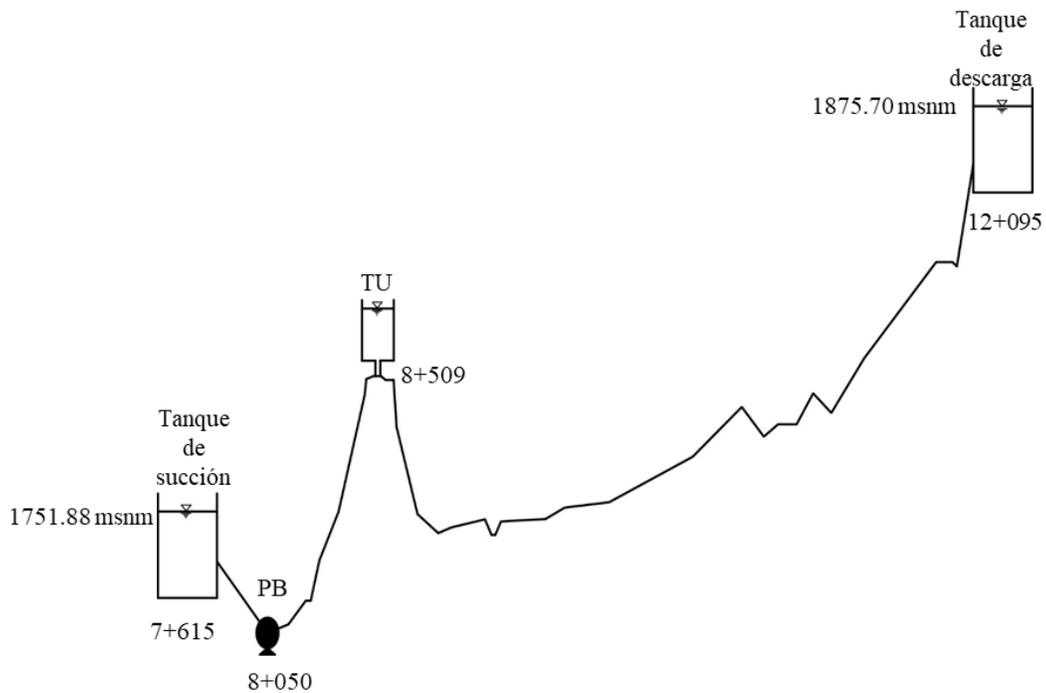


Figura 5.25: Esquema del sistema de bombeo con tanque unidireccional.

El arreglo de las tuberías del sistema con el tanque unidireccional queda representado en TRANS como se muestra en la figura 5.26.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
	Tanque Succión	TUBO 01	435.000	2.900	1000.0000	0.01400	4.000000	PB	
	PB	TUBO 02	459.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	TU	
✓	TU	TUBO 03	3586.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	Tanque Descarga	
<input type="button" value="Nuevo Tramo"/> <input type="button" value="Edita Tramo"/> <input type="button" value="Divide Tramo"/> <input type="button" value="Elimina tramo"/>									

Figura 5.26: Arreglo de las tuberías del sistema con tanque unidireccional en el programa TRANS.

El tramo de descarga queda dividido en dos tramos (*TUBO 02* y *TUBO 03*) entre los cuales se colocó el tanque unidireccional con las características y dimensiones presentadas en las figuras 5.27 y 5.28.

TANQUE UNIDIRECCIONAL		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: TU		Edición de TU	
Nombre	TU	Tramo aguas arriba	TUBO 02
Número de válvulas de retención	1	Tramo aguas abajo	TUBO 03
Coef. de pérdida de carga, válvulas de retención [s^2/m^5]	0.1	Coeficiente de pérdida de una válvula de llenado [s^2/m^5]	0.1
Desplante del tanque [msnm]	1795.63	Longitud de la tubería de conexión tanque-conducción [m]	10
Área del tanque [m^2]	50	Diámetro de la tubería de conexión tanque-conducción [m]	1
Tirante del agua en el tanque [m]	15	Bordo libre del agua [m]	1
Número de válvulas de llenado	1		
<input type="button" value="Graba"/>	<input type="button" value="Consulta"/>	<input type="button" value="Inicializa"/>	<input type="button" value="Baja"/>
<input type="button" value="Salir"/>			

Figura 5.27: Características del tanque unidireccional.

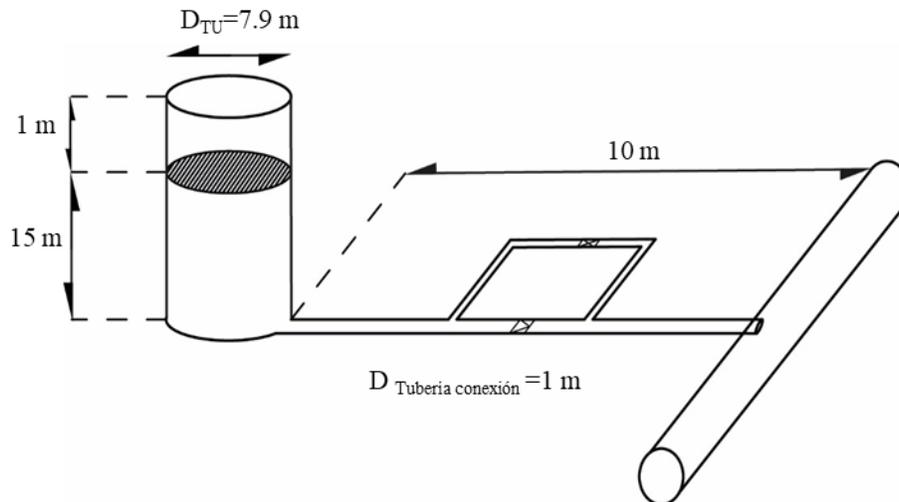


Figura 5.28: Dimensiones del tanque unidireccional.

Las características como el área y el tirante del agua se calculan de manera preliminar con el método presentado en el anexo 6 la Ref. 4 y se van optimizando a través de varias simulaciones y del análisis de los archivos de resultados que el programa brinda al usuario, como se mencionó para el caso 2 de la sección 5.1.

Lo que se presenta en la figura 5.28 son las dimensiones óptimas luego de varias simulaciones.

La longitud de la tubería de conexión tiene es de 10 m y un diámetro de 1 m, además el bordo libre del agua se estableció como de 1 m. Las dimensiones anteriores pueden cambiar, como se verá más adelante.

Una vez dado de alta el tanque unidireccional y guardado el archivo, se procede a hacer la simulación del ejemplo para este caso.

Lo primero a revisar para este caso en donde se cuenta con un tanque unidireccional es revisar las piezométricas, dadas por el programa o bien, por el archivo de resultados con terminación `_HEX.csv`, del cual resulta la siguiente gráfica.

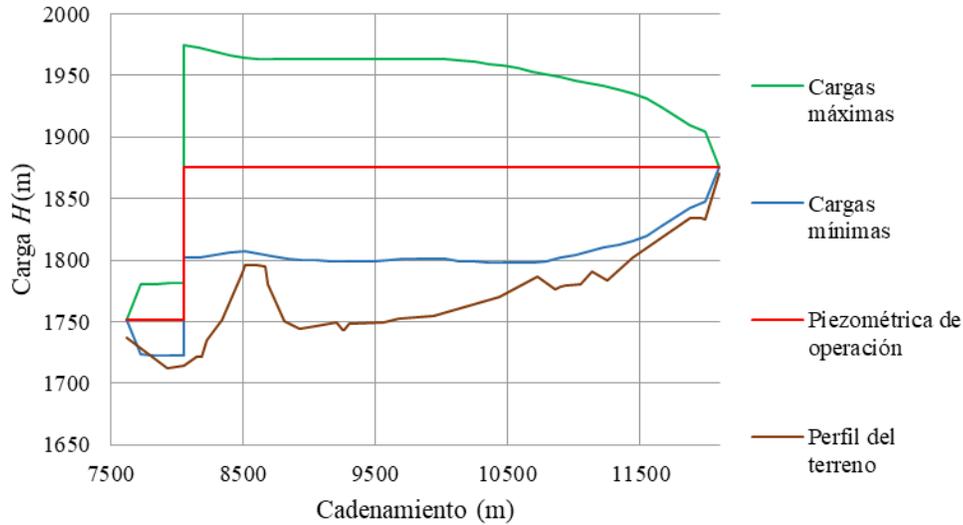


Figura 5.29: Piezométricas con tanque unidireccional

Como se observa en la figura, el tanque unidireccional ha solucionado el problema del corte de la línea de cargas mínimas con el perfil del terreno en el tramo de descarga. Sin embargo, en el tramo de succión se puede ver todavía el corte de la línea de cargas mínimas con el perfil del terreno. A partir de esta gráfica se puede tomar la decisión de solucionar el problema de las piezométricas en el tramo de succión con el uso de otro dispositivo de control de transitorio ubicado en dicho tramo. Por lo que otra solución posible del sistema sería colocar un tanque unidireccional y una torre de oscilación.

Debido a que para cada solución se debe hacer una simulación y analizar sus archivos de resultados correspondientes, se tendrá un tercer caso.

Caso 3: Sistema con tanque unidireccional y torre de oscilación

Para este ejemplo se tendrá, a parte del tanque unidireccional que se tiene en el caso 2, una torre de oscilación ubicada en el cadenamiento 7+925 justo en el tramo de succión como lo indica el esquema de la figura 5.30.

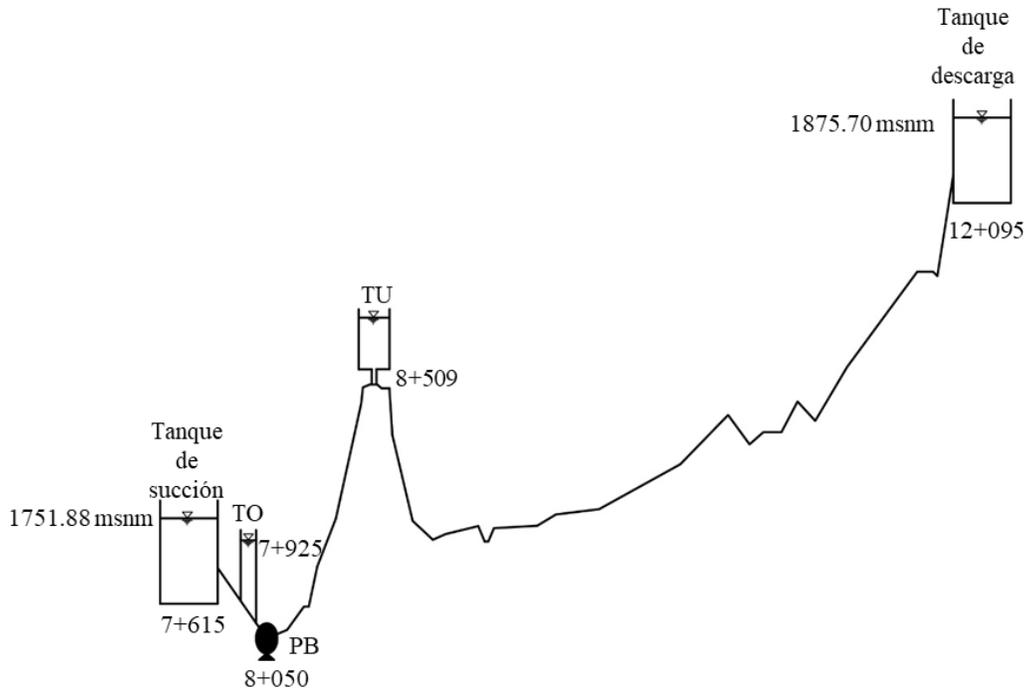


Figura 5.30: Esquema de sistema con torre de oscilación antes de la planta de bombeo y tanque unidireccional.

La representación del sistema con el tanque unidireccional (TU) y con la torre de oscilación en el tramo de succión (TO antes de PB) se muestra en la figura 5.31.

Tramos	Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas
✓	Tanque Succión	TUBO 01	310.000	2.900	1000.0000	0.01400	4.000000	TO antes de PB
	TO antes de PB	TUBO 02	125.000	2.900	1000.0000	0.01400	4.000000	PB
	PB	TUBO 03	459.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	TU
	TU	TUBO 04	3586.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	Tanque Descarga
<p>Nuevo Tramo Edita Tramo Divide Tramo Elimina tramo</p>								

Figura 5.31: Arreglo de las tuberías del sistema con tanque unidireccional y torre de oscilación en el tramo de succión en el programa TRANS.

Las características de la torre de oscilación son las mostradas en la figura 5.32. Las cuales resultan de varias simulaciones hechas.

TANQUE DE OSCILACIÓN Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: **TO antes de PB** Edición de TO antes de PB

Nombre:

Desplante [msnm]:

Área del tanque [m²]:

Altura [m]:

Tramo aguas arriba:

Tramo aguas abajo:

Tubería de conexión:

Longitud de la tubería de conexión pozo-conducción [m]:

Diámetro de la tubería de conexión pozo-conducción [m]:

Coefficiente de fricción de la tubería de conexión:

Graba Consulta Inicializa Baja Salir

Figura 5.32: Características de la torre de oscilación en el tramo de succión (TO antes de PB).

Cuando se hace la simulación del caso 3, considerando la torre de oscilación en el tramo de succión y el tanque unidireccional con las dimensiones propuestas en la figura 5.32 y se grafica la información del archivo de resultados con terminación `_HEX.csv` correspondiente a este ejemplo, se tienen las piezométricas mostradas en la figura 5.33.

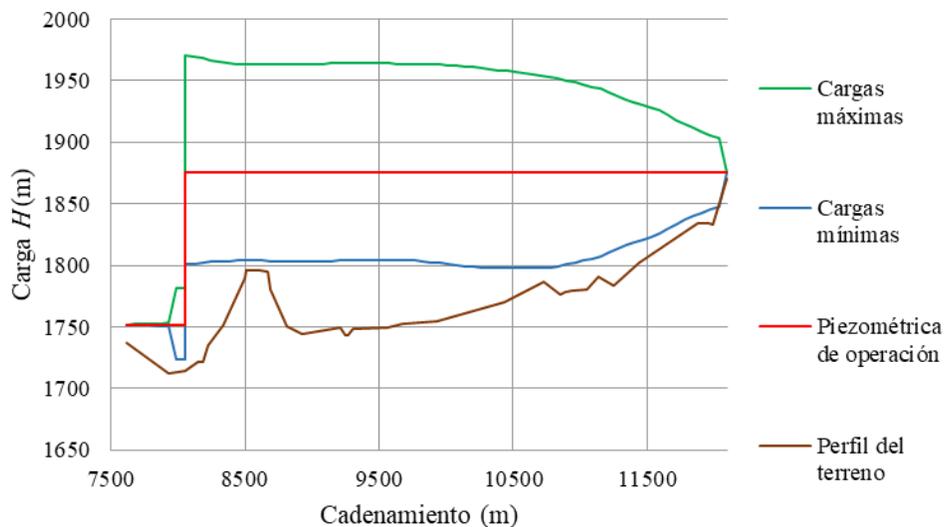


Figura 5.33: Piezométricas con tanque unidireccional y torre de oscilación en el tramo de succión.

Cuando se coloca la torre de oscilación en el tramo de succión, esta resuelve el problema del corte de la línea de cargas mínimas con el perfil del terreno en dicho tramo. La presencia de la torre también cambia un poco las piezométricas en el tramo de descarga, haciendo que la línea de cargas mínimas corte por poco el perfil del terreno al final de este tramo.

Un aspecto importante a revisar cuando se considera una tubería de conexión, es la velocidad que el agua alcanza en dicha tubería, la cual se recomienda sea menor que 4 m/s, de acuerdo a la Ref. 4. Esto se puede verificar a partir del archivo de resultados con terminación _Q.csv. Para el caso 3, este archivo contiene el gasto en la bomba y los que entregan o reciben los tanques de oscilación y unidireccional. Graficando el gasto en la tubería que conecta al tanque unidireccional con la línea principal se llega a lo mostrado en la figura 5.34

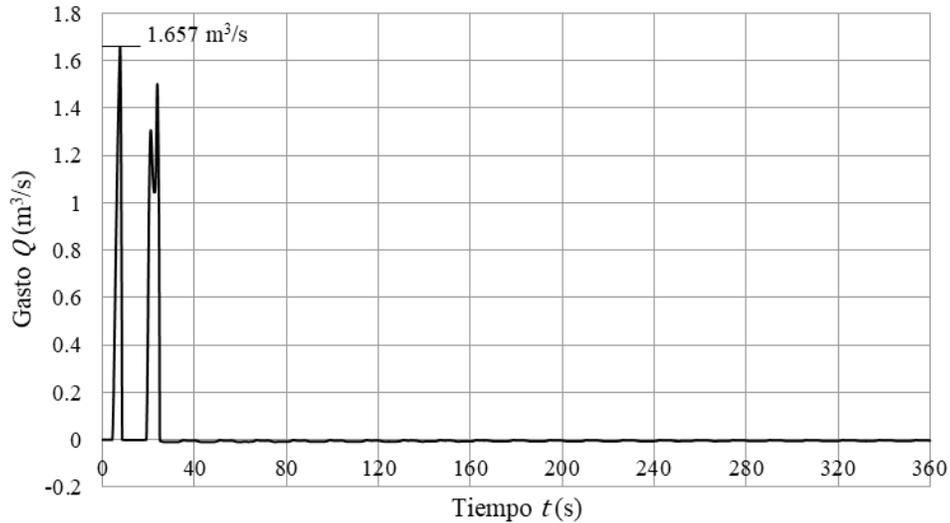


Figura 5.34: Variación del gasto en la tubería de conexión.

En esta gráfica se observa como el gasto en la tubería de conexión varía en función del tiempo, siendo los valores positivos cuando el tanque unidireccional aporta agua a la tubería principal y los negativos cuando el tanque recibe agua desde esta. En este ejemplo los valores negativos son tan pequeños que casi no se notan en la gráfica.

Para verificar que la velocidad en la tubería de conexión está en el rango sugerido, se usará la siguiente expresión:

$$V = \frac{Q}{A} \tag{5.2}$$

Donde:

V es la velocidad del agua en la tubería de conexión, en m/s.

Q es el gasto máximo en la tubería de conexión, en m³/s.

A es el área de la tubería de conexión, en m².

Para este caso el gasto máximo en la tubería de conexión Q es de 1.657 m³/s y el área A , a partir del diámetro de la tubería de conexión para el tanque unidireccional, es de 0.785 m².

Por lo que la velocidad queda como sigue:

$$V = \frac{1.657 \text{ m}^3/\text{s}}{0.785 \text{ m}^2} = 2.10 \text{ m/s}$$

Por lo que esta se encuentra en el rango sugerido.

Otro aspecto importante a revisar es la velocidad de giro en sentido contrario que soportan los equipos de bombeo una vez que se han puesto el tanque unidireccional y la torre de oscilación. Esto se puede verificar en el archivo de terminación `_RPM_Z.csv`, del cual resulta la gráfica de la figura 5.35.

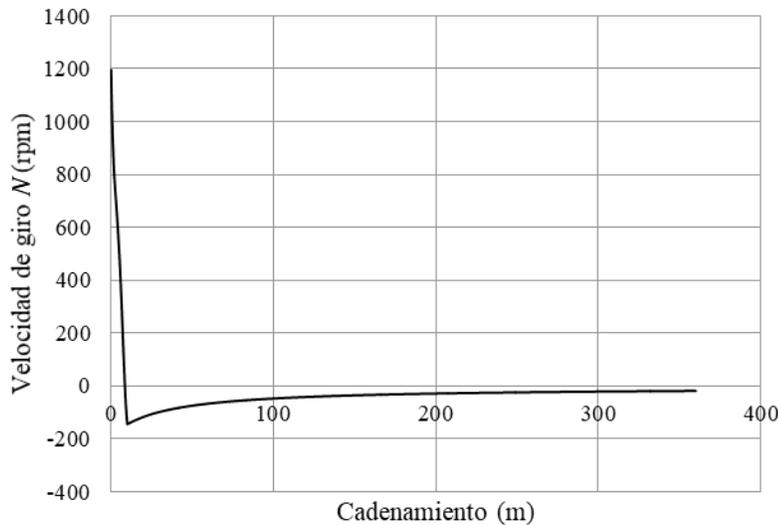


Figura 5.35: Velocidad de giro de las bombas con torre de oscilación y tanque unidireccional

En esta figura se puede ver que la velocidad de giro en sentido contrario que tiene que soportar el equipo de bombeo una vez que se presenta el transitorio no presenta valores muy altos, sin embargo, se debe verificar que el equipo de bombeo seleccionado soporte dicha velocidad de giro.

En conclusión, el tanque unidireccional por sí mismo no resolvió el problema del transitorio, se tuvo que poner otra estructura como lo fue la torre de oscilación en el tramo de succión para que se resolviera el problema de las depresiones. Pese a esto aún se presentan problemas de sobrepresiones y un pequeño corte de la línea de cargas mínimas con el perfil del terreno.

Por lo tanto, para este sistema quizá la mejor opción sea poner otro dispositivo de control de transitorio en lugar del tanque unidireccional.

Con lo anterior no se pretende anteponer la eficacia de un dispositivo sobre otro, si no el mostrar al lector que cada sistema se puede resolver con distintos tipos de estructuras de control de transitorios. Algunas funcionarán mejor que otras dependiendo de las características de un sistema de bombeo determinado, por lo que la mejor solución para un sistema quizá no lo sea para otro.

5.3 Ejemplo de un sistema con una cámara de aire

En el capítulo 3 se presentó lo que es una cámara de aire y sus ventajas sobre otros dispositivos para el control de transitorios, para entender mejor el procedimiento para diseñar una cámara de aire con el programa TRANS se presenta el mismo sistema de bombeo que el de la sección 5.2 en el que se presenta un paro súbito de bombeo.

La información de las bombas, elevaciones, cadenamientos y topografía que sigue la tubería son las mismas, así como el tiempo de simulación y la frecuencia de grabación.

Caso 1: Sistema sin cámara de aire

Cuando se simula el transitorio del sistema de bombeo sin ninguna estructura que ayude a contrarrestar los efectos del transitorio, las piezométricas son las mismas que las de la figura 5.24 del caso 1 en la sección anterior.

Ya que la tubería presenta problemas de depresiones y sobrepresiones cuando no se tiene algún dispositivo que permita reducir los efectos del transitorio, se procederá a colocar una cámara de aire.

Caso 2: Sistema con cámara de aire

Si se coloca una cámara de aire (CA), la cual, por motivos de mantenimiento se recomienda ubicar cerca de la planta de bombeo, para este caso en el cadenamiento 8+145, de acuerdo al esquema de la figura 5.36, se podrá hacer que la cámara reduzca la amplitud de la onda de presión que se genera debido al transitorio.

El sistema de bombeo en donde se tiene la cámara de aire (CA), tiene su representación en el programa TRANS de acuerdo a lo que se muestra en la figura 5.37.

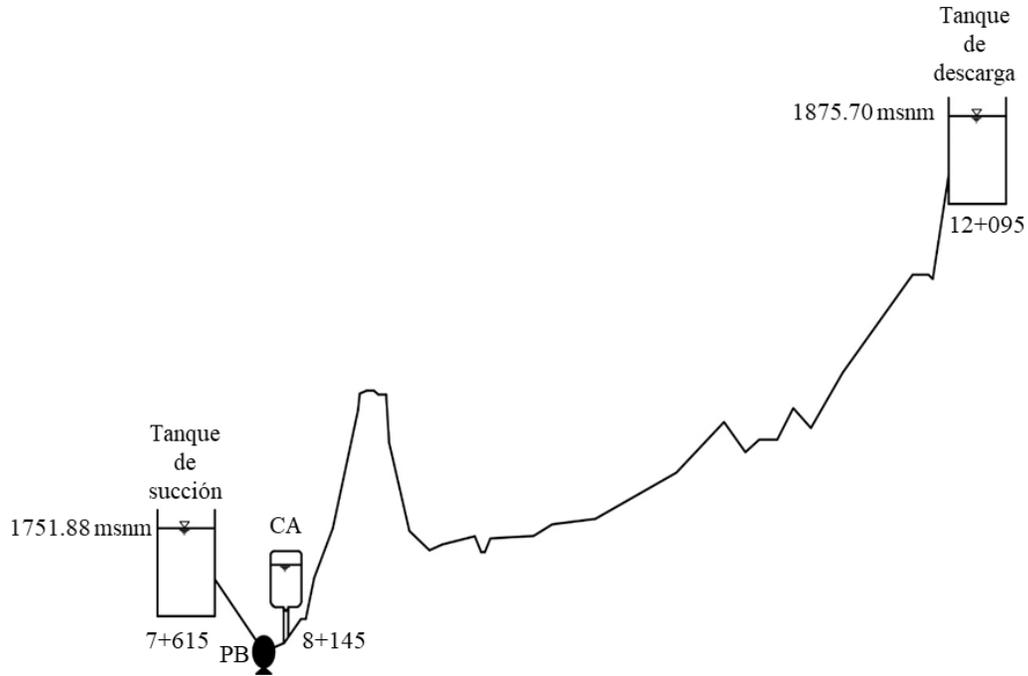


Figura 5.36: Esquema del sistema con cámara de aire.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
✓	Tanque Succión	TUBO 01	435.000	2.900	1000.0000	0.01400	4.000000	PB	
	PB	TUBO 02	95.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	CA	
	CA	TUBO 03	3950.000	3.100	1000.0000	0.01400	4.000000	Tanque Descarga	

Nuevo Tramo	Edita Tramo	Divide Tramo	Elimina tramo
-------------	-------------	--------------	---------------

Figura 5.37: Representación en TRANS del sistema con cámara de aire.

La información que se ingresó a la cámara de aire es la mostrada en la figura 5.38.

CÁMARA DE AIRE		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: CA		Edición de CA	
Nombre	CA	Tramo aguas arriba	TUBO 02
Coefficiente de pérdida a la salida de la cámara [s^2/m^5]	0.1	Tramo aguas abajo	TUBO 03
Volumen de aire inicial en la cámara [m^3]	45	Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m]	10
Área de la cámara [m^2]	11.7	Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m]	1.4
Cota del agua en la cámara [msnm]	1726		
Elevación base de la cámara [msnm]	1722		
Coefficiente de pérdida a la entrada de la cámara [s^2/m^5]	0.1		
Graba		Consulta	
Inicializa		Baja	
Salir			

Figura 5.38: Información ingresada a la cámara de aire.

Tanto el área, el volumen inicial de aire, así como la cota del agua en la cámara se calcularon de manera preliminar con el método presentado en el anexo 8 de la Ref. 4, sin embargo, después de varias simulaciones en donde se analizaron los archivos de resultados correspondientes, se llegó a los valores mostrados en la figura 5.38 y la 5.39 respecto al área, volumen de aire y cota del agua.

Los demás valores como lo son los coeficientes de pérdida a la entrada y salida de la cámara, la longitud y el diámetro de la conexión se propusieron de manera arbitraria para una primera simulación, sin embargo, los coeficientes de pérdida pueden cambiarse para controlar las sobrepresiones que se generan, así como el diámetro y la longitud de la tubería de conexión pueden variar de acuerdo a la velocidad del agua que se quiera tener en dicha tubería y al tamaño del predio en donde se vaya a colocar la cámara. La elevación de la base de la cámara se obtuvo de la topografía del terreno. Con tales características en la cámara, se procede a guardar el archivo y a simular el transitorio. Cabe mencionar que los coeficientes de pérdida a la entrada y a la salida de la cámara pueden cambiar, como se mostrará más adelante.

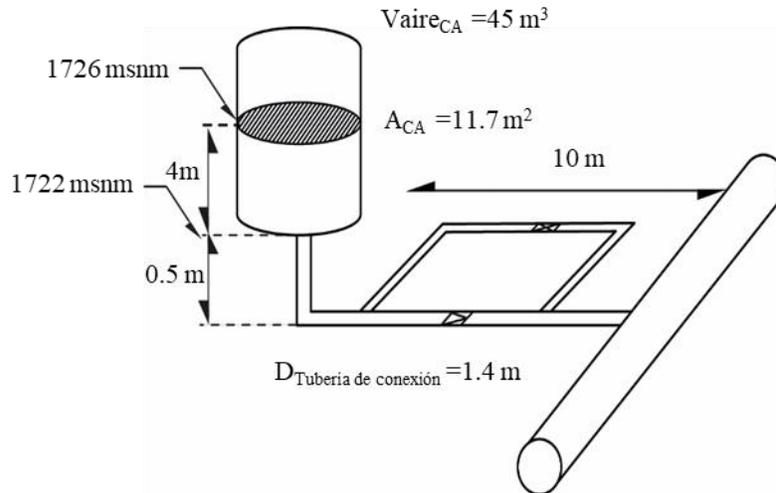


Figura 5.39: Dimensiones de la cámara de aire.

Primero, se revisarán las cargas piezométricas, a partir de los archivos de resultados generados para el caso 2 se puede llegar a las piezométricas mostradas en la figura 5.40.

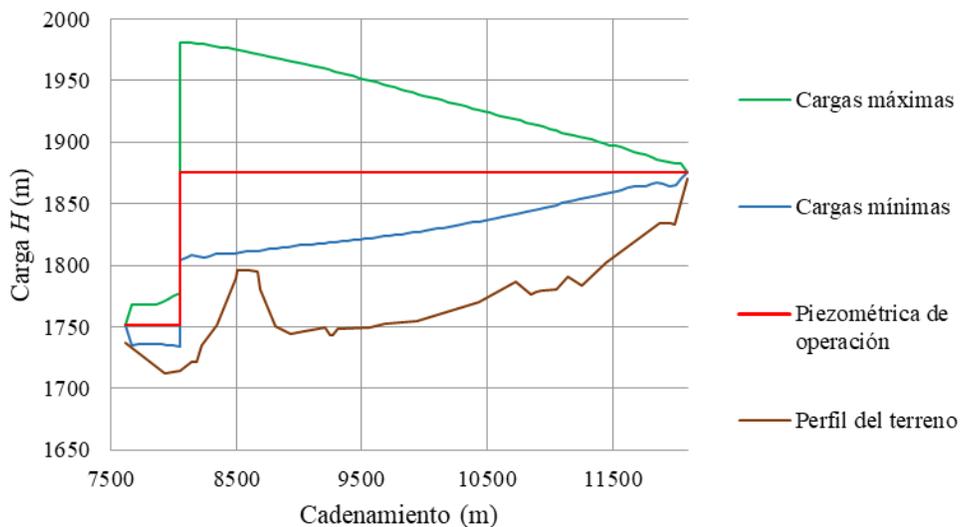


Figura 5.40: Piezométricas con cámara de aire.

La presencia de la cámara de aire en el sistema hace que la línea de cargas mínimas no corte con el perfil del terreno, por lo tanto, se resuelve el problema de depresión. Sin embargo, si se compara las piezométricas del sistema sin la cámara de aire (Figura 5.24 del caso 1 en la sección 5.2) y con cámara de aire (Figura 5.40 caso 2), se puede notar que las sobrepresiones en donde se encontraría la cámara de aire son del mismo orden o incluso pueden ser mayores cuando se tiene la cámara de aire, esto se debe a que la onda de depresión se refleja en el tanque de descarga como una onda de sobrepresión en dirección a la cámara de aire. Esta onda de sobrepresión hace que el agua que entra a la cámara comprima el aire que se encuentra dentro de esta, provocando el aumento de presión mostrado en la figura 5.40.

Por lo tanto, este problema de sobrepresiones se puede resolver sin la necesidad de cambiar las dimensiones de la cámara, modificando solamente el coeficiente de pérdida en la entrada de la cámara de aire, ya que la sobrepresión se da por el agua que viene de la tubería principal y entra a la cámara.

Caso 3: Sistema con cámara de aire y coeficiente de pérdida en la entrada K_e calculado.

Antes de modificar el coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara, se revisará que la cámara de aire no se vacíe y que sus dimensiones sean adecuadas para la variación del nivel del agua en esta. Para esto se revisará el archivo con terminación `_RPM_Z.csv` del caso 2, del cual se puede obtener la gráfica de la figura 5.41.

En esta gráfica se puede ver que la cámara no se vacía ya que el nivel mínimo del agua que se llega a presentar, queda por encima del nivel de la base de la cámara.

El nivel del agua en la cámara puede quedar un poco más abajo sin rebasar el nivel de la base de la cámara, esto podría resultar en una cámara de aire más pequeña. Para este caso se dejarán las dimensiones presentadas en la figura 5.39.

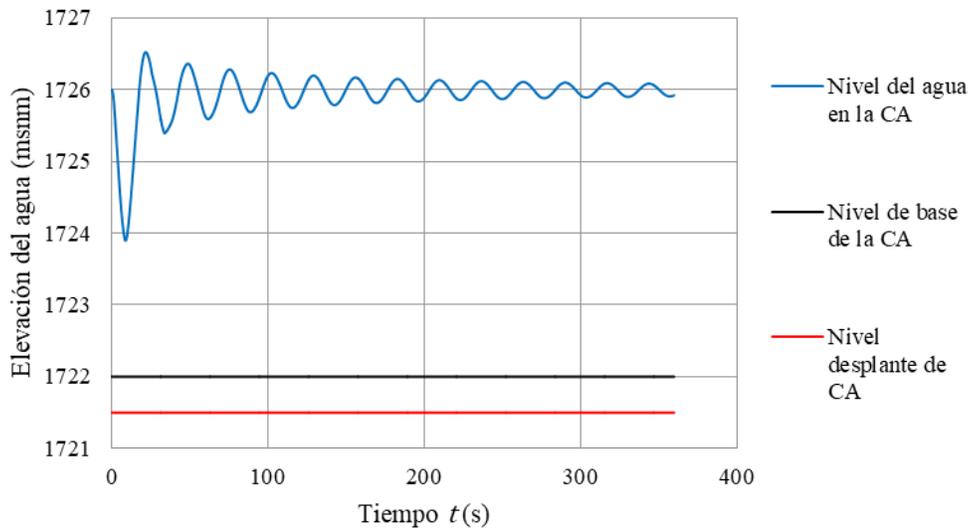


Figura 5.41: Variación del nivel del agua en la cámara de aire.

Para disminuir las sobrepresiones sin modificar las dimensiones ya establecidas de la cámara de aire, se usará un método presentado en el anexo 8 la Ref. 4, el cual sirve para predeterminar el valor mínimo del coeficiente de pérdida en la entrada de la cámara a partir del cual se puede disminuir la sobrepresión. Esto se obtiene con la siguiente expresión:

$$K_e = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_0}{Q^2} \tag{5.3}$$

Donde:

K_e es el coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara, en s^2/m^5 .

$H_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima que se presenta en la conexión de la cámara con la tubería principal durante el transitorio, en m.

H_0 es la carga de presión en la conexión de la tubería con la cámara, a la que se desea reducir las sobrepresiones, en este caso se desea que las sobrepresiones se reduzcan de manera ideal a la de operación a flujo establecido, es decir en $t = 0$, en m.

Q es el flujo o gasto máximo que ingresa a la cámara de aire, en m^3/s .

Cabe señalar que el método usado es una de las opciones que el usuario del programa puede usar para resolver el problema de las sobrepresiones y este es solo para predimensionar la pérdida en la entrada de la cámara. Este valor sirve como punto de partida para realizar varias simulaciones y observar el comportamiento de las sobrepresiones con tal valor de pérdida, el cual se irá mejorando hasta que el problema de las sobrepresiones quede resuelto.

La carga máxima en la conexión de la cámara con la tubería $H_{m\acute{a}x}$ se puede obtener del archivo de resultados con terminación _H.csv correspondiente al caso 2. A partir de la gráfica de la figura 5.42, la carga máxima resulta ser de 1980.82 m.

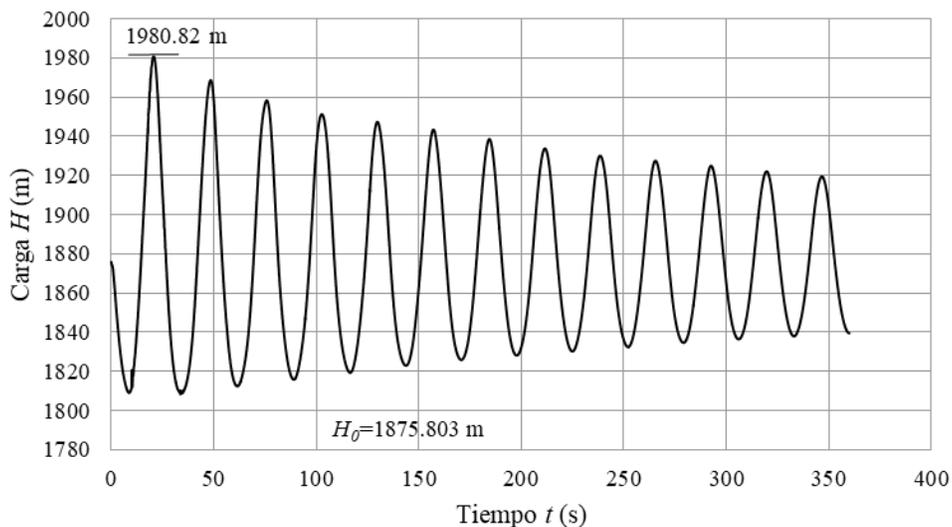


Figura 5.42: Variación de la carga en la conexión de la tubería con la cámara de aire.

El gasto se puede obtener del archivo con terminación _Q.csv correspondiente al caso 2, el cual es negativo debido a que este entra a la cámara. Se tomará el valor máximo absoluto de los gastos, el cual resulta de 5.515 m^3/s de acuerdo a la gráfica de la figura 5.43.

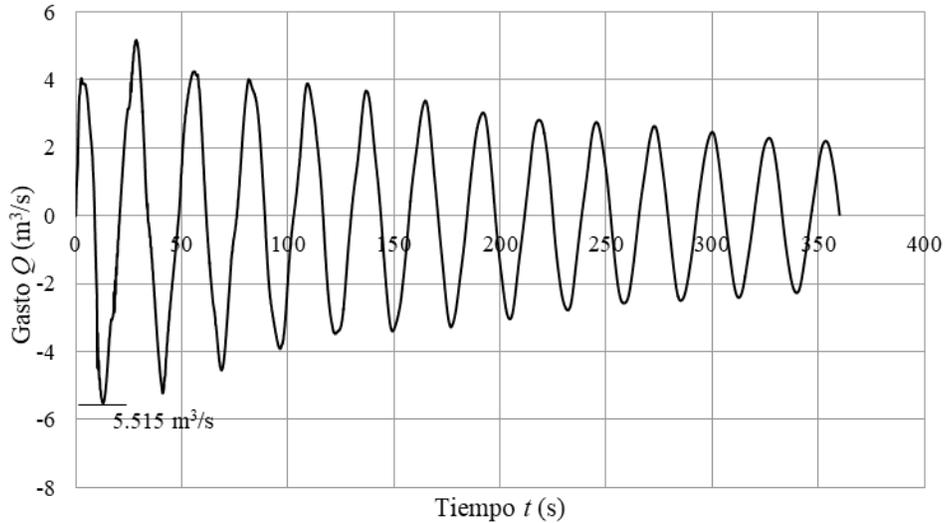


Figura 5.43: Variación del gasto en la cámara de aire.

Como lo que se desea es que la sobrepresión se reduzca idealmente desde el valor máximo que es de 1980.82 mca hasta el valor de la carga de presión en flujo establecido, el cual es de 1875.803 mca en la descarga de la bomba, de acuerdo a la figura 5.40, se usará la expresión (5.3) para el ejemplo, por lo tanto, se tendrá el siguiente coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara de aire:

$$K_e = \frac{1980.82 \text{ m} - 1875.803 \text{ m}}{(5.515 \text{ m}^3/\text{s})^2} = 3.452 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

Si bien, este coeficiente de pérdida mejora el problema de sobrepresiones al ser mayor que el que se tenía en un principio, el valor que mejor resuelve el problema de sobrepresiones, después de varias simulaciones, es el de $5 \text{ s}^2/\text{m}^5$ como se muestra en la figura 5.44. Por lo que con este valor de coeficiente de pérdida se puede tener las piezométricas mostradas en la figura 5.45.

Si se compara las figuras 5.45 (correspondiente al caso 3) con la 5.40 (correspondiente al caso 2) se puede notar una disminución en las sobrepresiones de aproximadamente 57 mca, por lo que se las sobrepresiones quedaría resuelto de esta manera.

CÁMARA DE AIRE		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: CA		Edición de CA	
Nombre	CA	Tramo aguas arriba	TUBO 02
Coefficiente de pérdida a la salida de la cámara [s^2/m^5]	0.1	Tramo aguas abajo	TUBO 03
Volumen de aire inicial en la cámara [m^3]	45	Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m]	10
Área de la cámara [m^2]	11.7	Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m]	1.4
Cota del agua en la cámara [msnm]	1726		
Elevación base de la cámara [msnm]	1722		
Coefficiente de pérdida a la entrada de la cámara [s^2/m^5]	5		
Graba		Consulta	
Inicializa		Baja	
Salir			

Figura 5.44: Información de la cámara de aire con el coeficiente de pérdida a la entrada de $5 \text{ s}^2/\text{m}^5$.

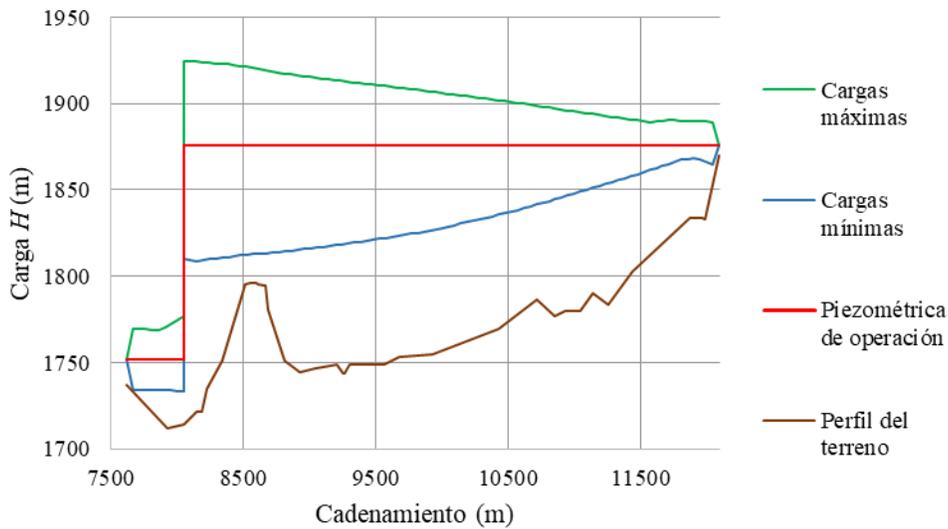


Figura 5.45: Piezométricas con cámara de aire y coeficiente de pérdida de $5 \text{ s}^2/\text{m}^5$.

Para revisar que la velocidad de la tubería de conexión se encuentre en el rango recomendado menor a 4 m/s, se revisará el archivo con terminación `_Q.csv` correspondiente caso 3 con el coeficiente de pérdida de $5 \text{ s}^2/\text{m}^5$, cuya gráfica de gasto en función del tiempo difiere a la presentada en la figura 5.42 correspondiente al coeficiente de pérdida de $0.1 \text{ s}^2/\text{m}^5$. Dicha gráfica se presenta a continuación en la figura 5.46.

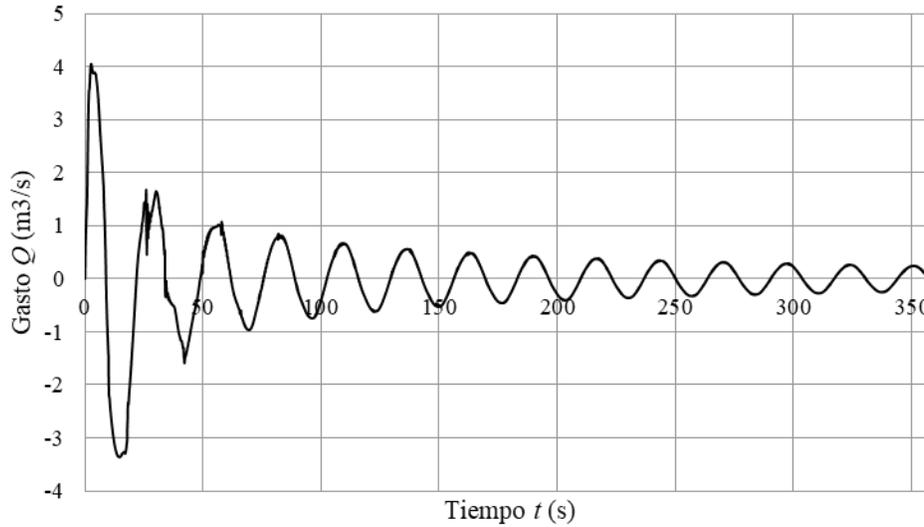


Figura 5.46: Variación del gasto con cámara de aire y coeficiente de pérdida de $5 s^2/m^5$.

El gasto máximo que se presenta en la tubería es de $4.05 m^3/s$ y el área de la tubería de conexión con diámetro de $1.4 m$, es de $1.53 m^2$, por lo tanto, aplicando la expresión (5.2), se tiene lo siguiente:

$$V = \frac{4.05 m^3/s}{1.53 m^2} = 2.64 m/s$$

Por lo tanto, la velocidad del agua en la tubería se encuentra en el rango recomendado.

Otro aspecto a revisar es la velocidad de giro en sentido contrario que el equipo de bombeo debe soportar cuando se presenta el transitorio, la cual se puede verificar del archivo de resultados con terminación `_RPM_Z` correspondiente al caso 3 como lo muestra la gráfica de la figura 5.47.

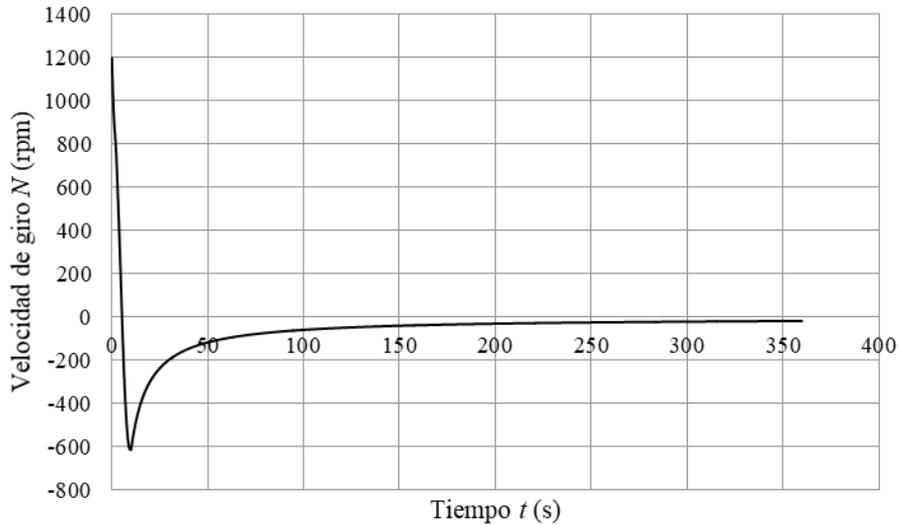


Figura 5.47: Velocidad de giro con cámara de aire.

En esta figura se puede ver que el equipo de bombeo tiene que soportar valores de velocidad de giro en sentido contrario del orden de 600 rpm. Esto debe contrastarse con las especificaciones del equipo de bombeo.

5.4 Ejemplo de un sistema con una válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la válvula de admisión y expulsión de aire puede usarse como dispositivo contra los efectos de un transitorio, ayudando principalmente en el control de las depresiones que puedan presentarse en un sistema.

Para la simulación de una VAEA en el sistema TRANS se usará un ejemplo en el cual se pueda ver claramente el efecto de tal estructura en el sistema. El esquema del ejemplo se puede ver en la figura 5.48.

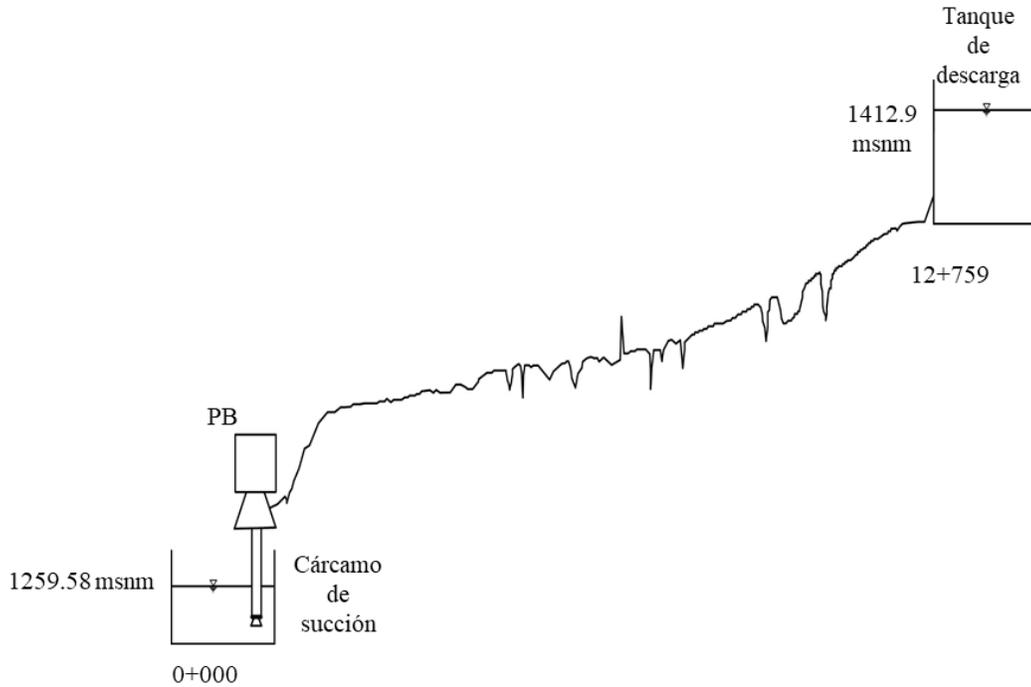


Figura 5.48: Esquema de sistema sin dispositivo contra transitorio.

En este ejemplo, se tienen dos equipos de bombeo en un cárcamo de succión por lo que no hay tramo de succión como en los ejemplos anteriores. La línea de conducción sigue la topografía mostrada en la figura 5.48 y sus características son las de la tabla 5.6.

A su vez, la tabla 5.7 y 5.8 muestran las condiciones a flujo establecido del sistema y las características del equipo de bombeo, respectivamente.

Tabla 5.6: Propiedades de la tubería del ejemplo de la figura 5.47.

Longitud l (m)	Diámetro D (m)	Área A (m ²)	Celeridad c (m/s)	Coef. Fricción f D-W
12759.529	0.7429	0.4334	1000	0.0142

Tabla 5.7: Condiciones a flujo establecido del sistema.

Gasto Q (m ³ /s)	Cota H succión (msnm)	Cota H descarga (msnm)
0.56	1259.58	1412.9

Tabla 5.8: Características del equipo de bombeo.

No. de bombas	Succión sencilla con 9 impulsores	Eficiencia máxima $\eta_{m\acute{a}x}$	Velocidad de giro de dise\~no N_R (rpm)	Carga de dise\~no H_R (m)	Gasto de dise\~no Q_R (m ³ /s)	Velocidad espec\~fica N_s	V\~lvulas Check en la descarga de las bombas
2		0.865	1770	174.14	0.28	101.5	

En el sistema de bombeo se presenta un paro s\~bito del bombeo en los equipos y, por lo tanto, ocurrir\~a un fen\~meno transitorio a lo largo de la tuber\~a. La conducci\~n del sistema queda representada en el programa TRANS de la manera en como se muestra en la figura 5.49.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducci\~n	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Di\~metro	Celeridad	C. Fricci\~n	Gasto	Extremo aguas	
<input checked="" type="checkbox"/>	PB	TUBO 01	12759.529	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	Descarga	
<input type="checkbox"/>									

Nuevo Tramo	Edita Tramo	Divide Tramo	Elimina tramo
-------------	-------------	--------------	---------------

Figura 5.49: Sistema de bombeo sin dispositivo contra transitorio representado en el programa TRANS.

La conducci\~n del sistema se puede representar con un solo tramo (*TUBO 01*), ya que las propiedades de este, para el ejemplo, no cambian a lo largo de la tuber\~a.

La frontera aguas abajo del *TUBO 01* es un tanque de carga constante (*Descarga*) y para la frontera aguas arriba se tiene una maniobra de tipo *Paro s\~bito de bombeo*, para la cual se ingresar\~a la informaci\~n de la tabla 5.8 como se muestra en la siguiente figura 5.50.

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO AGUAS ARRIBA Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes: PB Edición de PB

Nombre PB Tramo aguas abajo TUBO 01

Número de bombas 2 Elevación del nivel de succión [msnm] 1259.58

Instante en que inicia el disparo [s] 0 Cadenamiento planta de bombeo [m] 0

Tipo de válvulas en la descarga de las bombas:

Válvula de control

Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga:

Coefficiente mínimo de pérdida [s^2/m^5] 0.002

Datos bombas

Ángulo máximo de las curvas fh y $f\beta$ 90

Incremento angular entre puntos 5
 $1 \leq \Delta\theta \leq 10$

Gasto de diseño [m^3/s] 0.28

Carga de diseño [m] 174.14

Velocidad de diseño [rpm] 1770

Eficiencia máxima 0.865
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [$kg \cdot m^2$] 24.2

$[N_s] = \frac{rpm \cdot \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$ Velocidad específica [N_s] 85.2
(Opcional)

Captura datos curva fh

Captura datos curva f\beta

Observaciones...

Graba
Consulta
Inicializa
Baja
Salir

Figura 5.50: Información para maniobra de paro súbito de bombeo.

Debido a que el tipo de válvulas que hay en la descarga es de retención o check, no se necesita información de los coeficientes del polinomio y, las curvas fh y $f\beta$ irán de 0° a 90° .

El número de bombas que se tiene es de dos, el instante en que inicia el disparo es en el tiempo cero y el coeficiente mínimo de pérdida de la válvula de descarga es de $0.002 \text{ s}^2/m^5$.

La elevación del nivel de succión se obtiene de la tabla 5.7, la planta de bombeo se encuentra en el cadenamiento cero.

Los datos de las bombas como lo son el gasto de diseño, carga de diseño, velocidad de giro, eficiencia máxima y velocidad específica son los que se presentan en la tabla 5.8.

Las curvas de carga fh y momento $f\beta$ que se usarán son las correspondientes a la velocidad específica más cercana a la de $N_s = 101.5$ la cual es la de $N_s = 85.20$. Esto debido a que los datos de las curvas correspondientes a la velocidad específica $N_s = 101.5$ no se pueden construir por completo. Los datos de las curvas fh y $f\beta$ correspondientes a $N_s = 85.20$ que se publican en la Ref. 7 se presentan en la tabla 5.9 y en las gráficas 5.51 y 5.52.

Tabla 5.9: Curvas f_h y f_β para una velocidad específica de $N_S = 85.20$ obtenidas de la Ref. 7.

θ	f_h	f_β
0	-1.22	-1.35
5	-1.07	-1.14
10	-0.90	-0.91
15	-0.74	-0.69
20	-0.54	-0.40
25	-0.36	-0.15
30	-0.15	0.05
35	0.06	0.21
40	0.29	0.38
45	0.50	0.50
50	0.70	0.60
55	0.89	0.69
60	1.04	0.74
65	1.19	0.79
70	1.30	0.81
75	1.40	0.84
80	1.49	0.87
85	1.53	0.91
90	1.57	0.99

$$[N_S] = (rpm \sqrt{m^3/s}) / (m^{0.75})$$

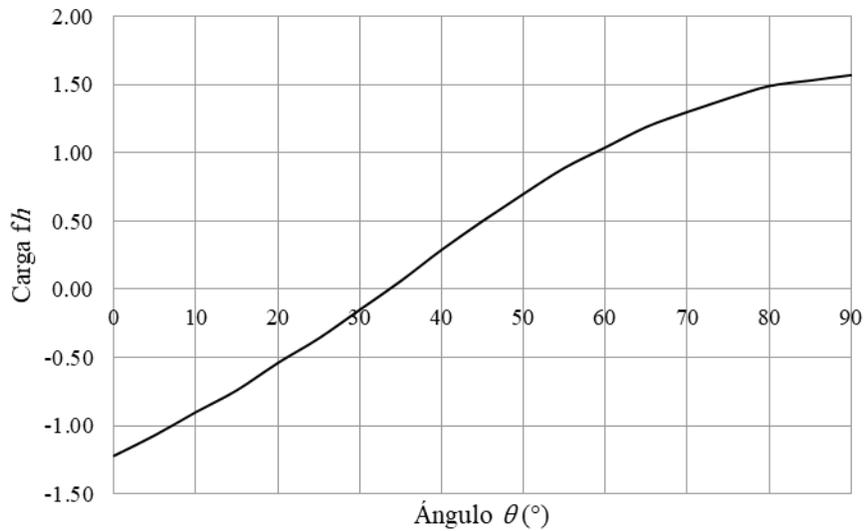


Figura 5.51: Curva f_h para la velocidad específica de $N_S = 85.20$.

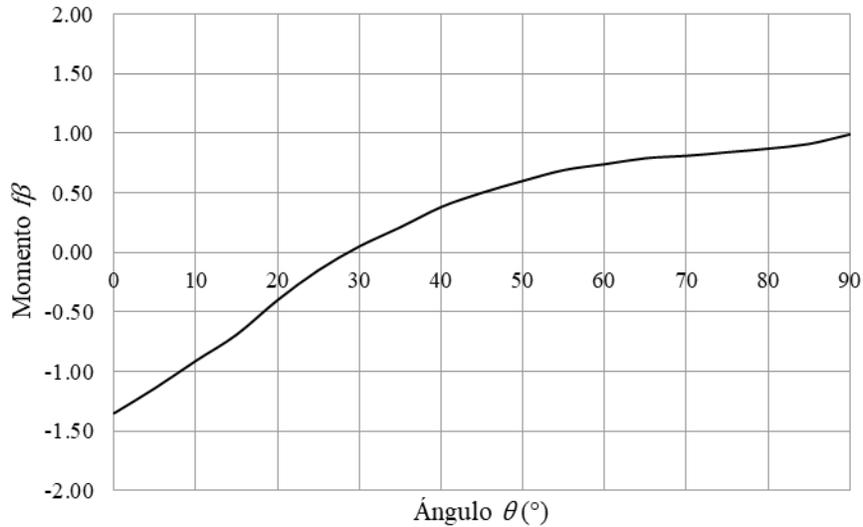


Figura 5.52: Curva $f\beta$ para la velocidad específica de $N_S = 85.20$.

Una vez que se ingresa la información anterior a TRANS, el archivo se guarda con un tiempo de simulación de 300 s y una frecuencia de grabación de 1.

Caso 1: Sistema sin dispositivo contra transitorio.

Después de guardar el archivo, se procede a simular el transitorio, generándose los archivos de resultados correspondientes al caso 1 en el que no hay dispositivo contra transitorio.

A partir del archivo de resultados en donde se pueden ver las cargas piezométricas (Archivo con terminación_HEX.csv) o de indicar al programa que nos muestre las piezométricas, se obtiene la gráfica de la figura 5.53.

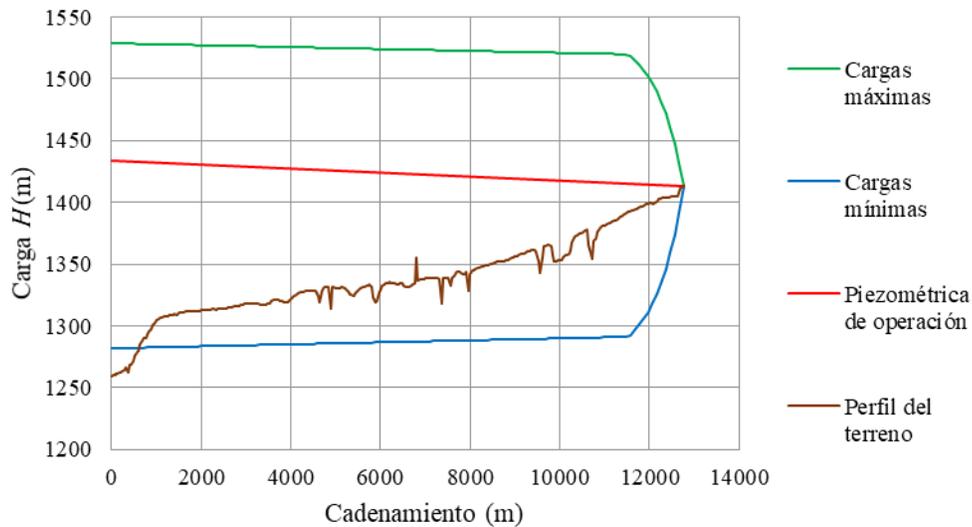


Figura 5.53: Piezométricas sin dispositivo contra transitorios.

En la figura 5.53, la línea de cargas mínimas corta con el perfil del terreno prácticamente a todo lo largo de la tubería, por lo que se presentarán problemas de depresiones en el sistema si no se considera algún dispositivo o estructura que controle el transitorio que se presenta debido al paro del equipo de bombeo.

Las cargas máximas son del orden de los 1530 mca en la descarga de la bomba, mientras que en flujo establecido son de 1433 mca, por lo que la sobrepresión que se presenta debido al transitorio es de 97 mca.

Dicho problema se puede resolver con alguna estructura que amortigüe los efectos del transitorio, para este ejemplo, se propondrá una cámara de aire.

Caso 2: Sistema con cámara de aire.

La cámara de aire CA se colocará en el cadenamamiento 0+100 con las características mostradas en las figuras 5.54 y 5.55.

CÁMARA DE AIRE		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes: CA		Edición de CA	
Nombre	CA	Tramo aguas arriba	TUBO 01
Coefficiente de pérdida a la salida de la cámara [s ² /m ⁵]	0.1	Tramo aguas abajo	TUBO 02
Volumen de aire inicial en la cámara [m ³]	25.14	Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m]	20
Área de la cámara [m ²]	12.56	Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m]	0.5
Cota del agua en la cámara [msnm]	1264		
Elevación base de la cámara [msnm]	1261		
Coefficiente de pérdida a la entrada de la cámara [s ² /m ⁵]	400		
Graba		Consulta	
Inicializa		Baja	
		Salir	

Figura 5.54: Información de la cámara de aire.

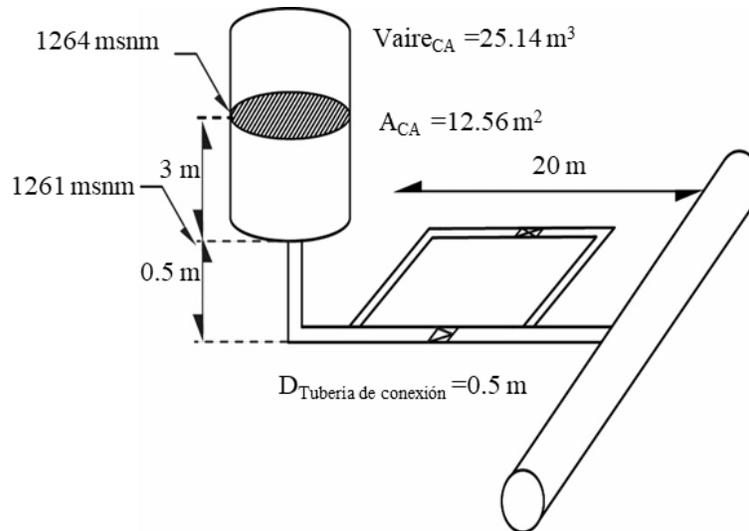


Figura 5.55: Características de la cámara de aire.

Las propiedades como el área, el volumen inicial del agua y la cota inicial del agua se obtuvieron de manera preliminar con el método del anexo 8 de la Ref. 4 y a través de varias simulaciones se optimizaron, llegando a los valores mostrados en las figuras 5.54 y 5.55.

Los coeficientes de pérdida a la salida y a la entrada, la longitud de la tubería de conexión, así como su diámetro se propusieron en un principio de manera arbitraria, sin embargo, estos se fueron afinando tras varias simulaciones y a partir de la información de los archivos de resultados para cada simulación hecha. Cabe señalar que, para el coeficiente de pérdida a la entrada de la cámara, el cual permite reducir las sobrepresiones, se usó el mismo método del anexo 8 la Ref. 4 que para la sección 5.3.

El arreglo de las tuberías con la cámara de aire CA queda representado de la manera en como se ve en la figura 5.56 en el programa TRANS.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
<input checked="" type="checkbox"/>	PB	TUBO 01	100.000	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	CA	
	CA	TUBO 02	12659.530	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	Descarga	

Nuevo Tramo		Edita Tramo		Divide Tramo		Elimina tramo	
-------------	--	-------------	--	--------------	--	---------------	--

Figura 5.56: Arreglo de las tuberías del sistema con la cámara de aire en el programa TRANS.

Una vez ingresada la información correspondiente a la cámara de aire, se guarda el archivo y se simula el transitorio. Del cual se generan los archivos de resultados correspondientes al ejemplo del caso 2.

Si se grafican las piezométricas del sistema correspondientes a la simulación se tendrá la figura 5.57.

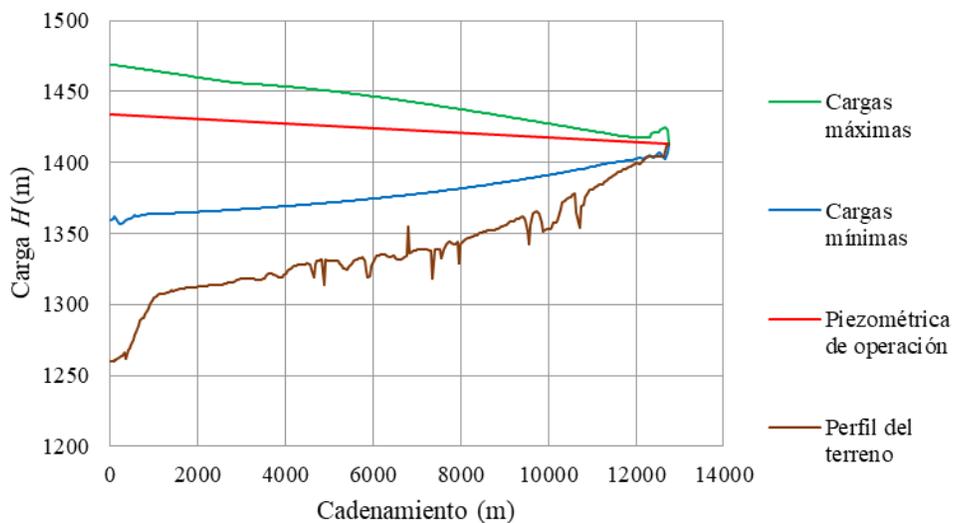


Figura 5.57: Piezométricas con cámara de aire.

Las sobrepresiones se redujeron considerablemente si se compara la figura 5.57 con la 5.53, llegando a valores cercanos a la piezométrica de operación casi en la mayoría de la tubería. Lo cual permitirá instalar menos longitud de tubería que tenga que soportar altas presiones.

En cuanto a las depresiones, estas quedan solucionadas en la mayor parte de la conducción a excepción de un corte aproximadamente en el cadenamiento 12+720. Este pequeño corte que se puede solucionar si se agrega una válvula de admisión y expulsión de aire al sistema. Se propondrá colocar dicho elemento en el cadenamiento 12+720.

El ingreso de aire a la tubería no será un problema mayor en este caso ya que la válvula se encontrará muy cerca de la descarga, por lo que el aire, una vez que ingrese a la tubería, saldrá de manera fácil por la descarga.

Caso 3: Sistema con cámara de aire y VAEA

La VAEA se colocará en el cadenamiento 12+720, el cual está muy cerca del punto de descarga.

Al momento de ingresar la información de la VAEA en TRANS, se tendrá lo mostrado en la figura 5.59.

The screenshot shows a software window titled "VAEA" from the "Instituto de Ingeniería, UNAM". The window is in "Edición de VAEA" mode. It features a dropdown menu for "Existentes:" with "VAEA" selected. The main area contains several input fields: "Nombre" (VAEA), "Cota de la entrada de aire [msnm]" (1412.5), "Presión atmosférica [mca]" (8.71), and "Coeficiente politrópico" (1.2). On the right side, there are two dropdown menus for "Tramo aguas arriba" (TUBO 03) and "Tramo aguas abajo" (TUBO 04). At the bottom, there is a navigation bar with buttons for "Graba", "Consulta", "Inicializa", "Baja", and "Salir".

Figura 5.58: Información ingresada para la VAEA.

El nivel de desplante de la VAEA es a los 1411.5 msnm y la cota de entrada del aire se estableció a 1 m por encima dicho desplante, la presión atmosférica se calcula en el lugar donde se coloca la VAEA y el coeficiente politrópico es el valor sugerido de 1.2. Las elevaciones del desplante y la cota de entrada del aire se pueden ver en el esquema de la figura 5.59.

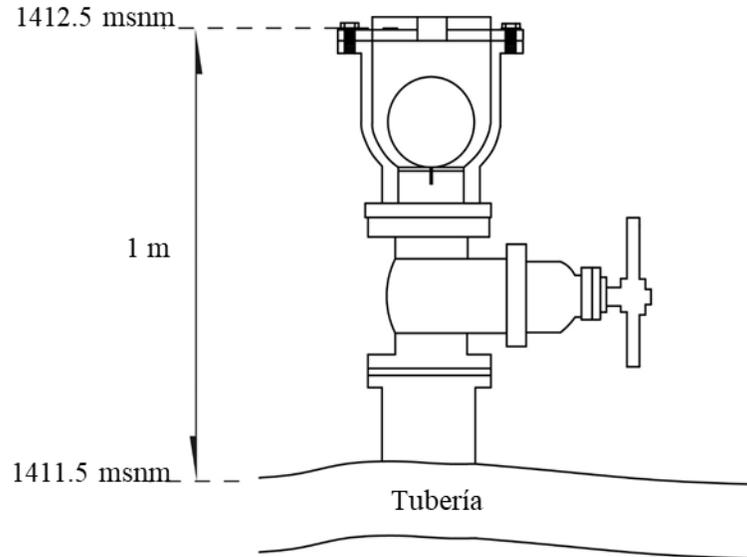


Figura 5.59: Esquema de la VAEA.

El sistema que contempla la cámara de aire y la VAEA queda representado en el programa TRANS de la manera en como se muestra en la figura 5.60.

Tramos		Fronteras y maniobras en los extremos		Elementos entre tramos		Maniobras entre tramos		Arreglo de la conducción	
	Extremo aguas	ID	Longitud	Diámetro	Celeridad	C. Fricción	Gasto	Extremo aguas	
✓	PB	TUBO 01	100.000	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	CA	
	CA	TUBO 02	12220.000	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	cambio	
	cambio	TUBO 03	400.000	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	VAEA	
	VAEA	TUBO 04	39.530	0.743	1000.0000	0.01420	0.560000	Descarga	
Nuevo Tramo			Edita Tramo			Divide Tramo		Elimina tramo	

Figura 5.60: Representación del sistema con cámara de aire y VAEA en el programa TRANS.

Las cargas piezométricas que se obtienen del archivo de resultados con terminación _HEX.csv correspondientes al caso 3 en el que están presentes una cámara de aire y una VAEA son las presentadas en la figura 5.61.

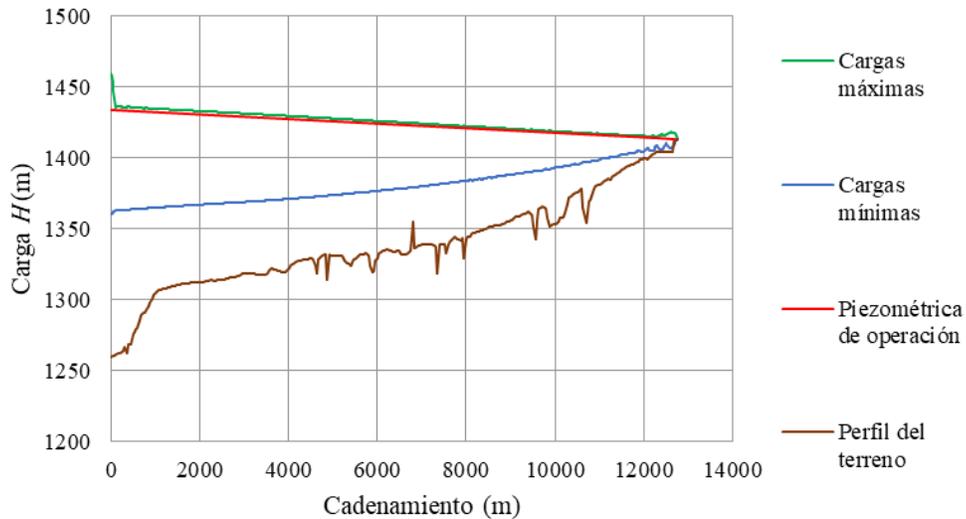


Figura 5.61: Piezométricas con cámara de aire y VAEA.

Comparando las piezométricas de la figura 5.61, correspondientes al caso 3, y de la 5.57, correspondientes al caso 2, se puede notar que la línea de cargas mínimas sube un poco en el extremo aguas abajo del tramo de descarga, evitándose así ese ligero corte en el perfil del terreno en este extremo. Mientras que, las sobrepresiones quedan pegadas a la piezométrica de operación. Por lo tanto, el problema de las piezométricas quedaría resuelto con las estructuras contempladas en el caso 3.

Otros aspectos importantes de revisar con la información correspondiente al caso 3 son el nivel del agua de la cámara de aire, la cual no deberá vaciarse una vez que el nivel de agua que hay dentro de esta varía debido al flujo transitorio. Esto se puede ver en la gráfica del nivel del agua en función del tiempo que se obtiene del archivo con terminación `_RMP_Z.csv` para el caso 3. Dicha gráfica es la que se presenta a continuación.

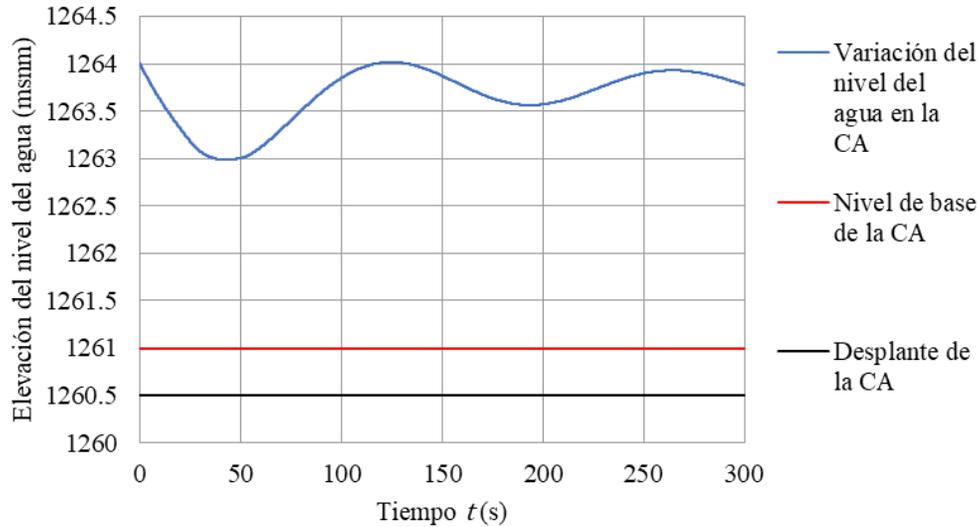


Figura 5.62: Variación del nivel del agua dentro de la cámara de aire.

El nivel del agua varía en función del tiempo y este nunca es menor que el nivel de la base de la cámara. La onda va disminuyendo en amplitud conforme el tiempo avanza por lo que se puede esperar que al final del fenómeno el nivel del agua alcance el nivel inicial de nuevo, por lo que nunca rebasará los límites del nivel de la base de la cámara ni el de desplante.

La velocidad del agua que entra y sale de la cámara de aire debe ser menor a 4 m/s, esto se puede verificar a partir del gasto que sale o entra a la cámara, dicha información se ve en el archivo de resultados con terminación `_Q.csv`, del cual resulta la siguiente gráfica.

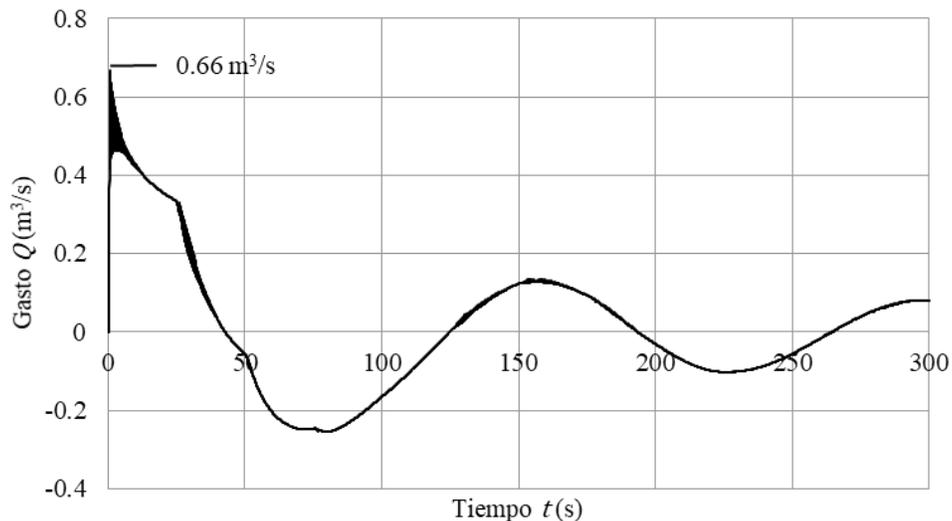


Figura 5.63: Variación del gasto que entra y sale de la cámara de aire.

El gasto máximo que se tiene en la tubería de conexión es de $0.66 \text{ m}^3/\text{s}$ y como se presentó en la figura 5.55, el diámetro de la tubería de conexión es de 0.5 m, por lo tanto, el área es de

0.196 m². A partir de la expresión (5.2) se tendrá que la velocidad del agua en la tubería de conexión es de 3.36 m/s, la cual es menor a 4 m/s.

La velocidad en sentido inverso que alcanzan los equipos de bombeo una vez que se presenta el transitorio se puede ver en la siguiente gráfica.

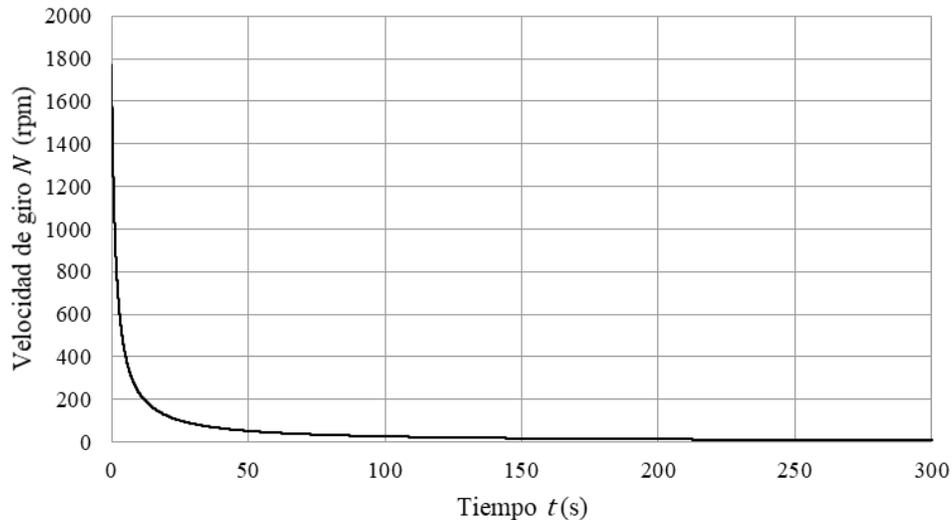


Figura 5.64: Velocidad de giro N durante el transitorio.

En este caso, como se ve en la figura 5.64, las bombas no giran en sentido inverso debido a que las válvulas en sus descargas son de tipo check.

Cuando se tiene una VAEA, es importante revisar el volumen de aire que esta deja ingresar a la tubería, esto se puede revisar en el archivo con terminación `_RMP_Z.csv`, del cual se obtendrá la siguiente gráfica.

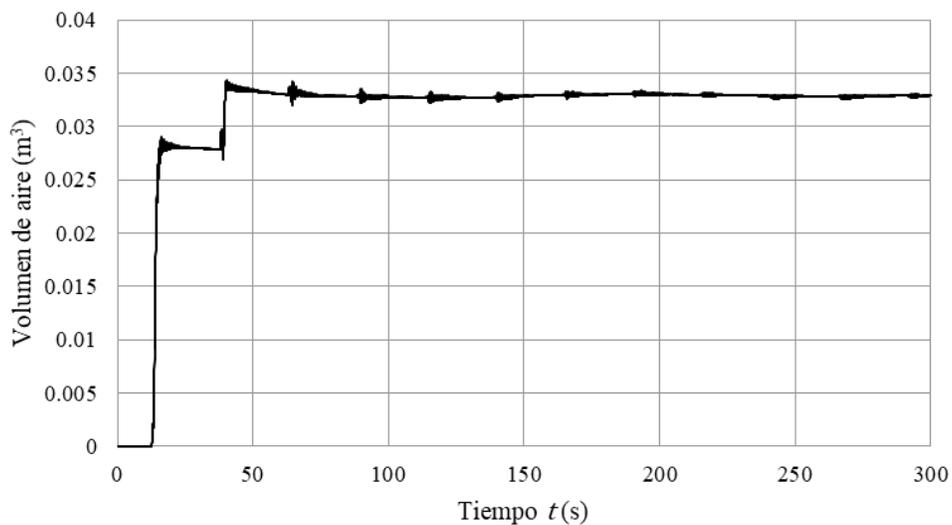


Figura 5.65: Volumen de aire acumulado que ingresa a la tubería por medio de la VAEA.

Como se ve en la gráfica de la figura 5.65, el volumen de aire que entra a la tubería va aumentando conforme pasa el tiempo hasta que al final la válvula deja de admitir aire y este llega a un valor constante.

También se debe analizar el flujo de aire que ingresa a la tubería ya que a partir de este, en conjunto con la presión establecida a la cual la válvula admitirá el ingreso de aire, se puede determinar el diámetro de la VAEA. El flujo de aire se puede obtener del archivo con terminación `_Q.csv`, del cual se puede obtener la gráfica de la figura 5.66.

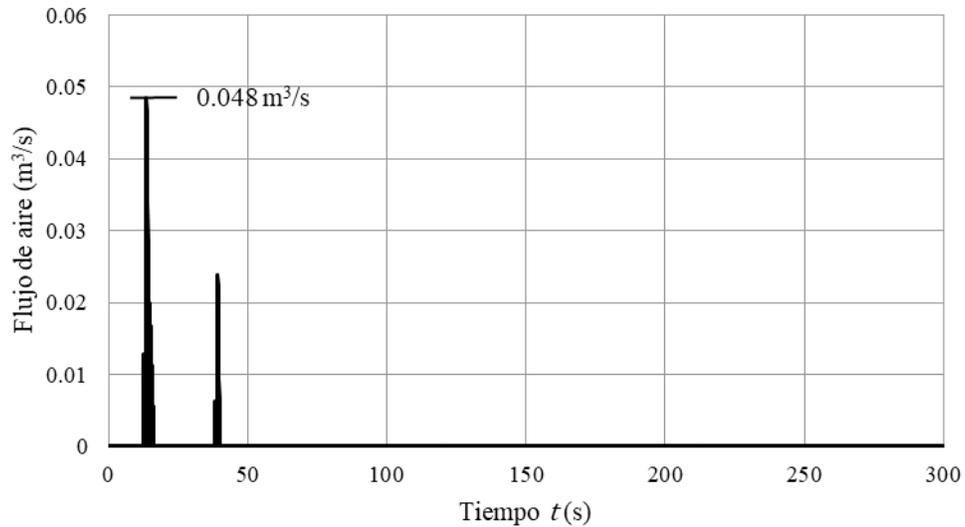


Figura 5.66: Flujo de aire que ingresa a la VAEA.

Los saltos que se observan en la gráfica de la figura 5.66 indican los instantes en los que ingresa aire a la tubería, es decir que en estos instantes la carga piezométrica alcanza el valor establecido de 1411.5 m.

Para obtener el diámetro de VAEA, los fabricantes de válvulas entregan curvas semejantes a la que se muestra en la figura 5.67.

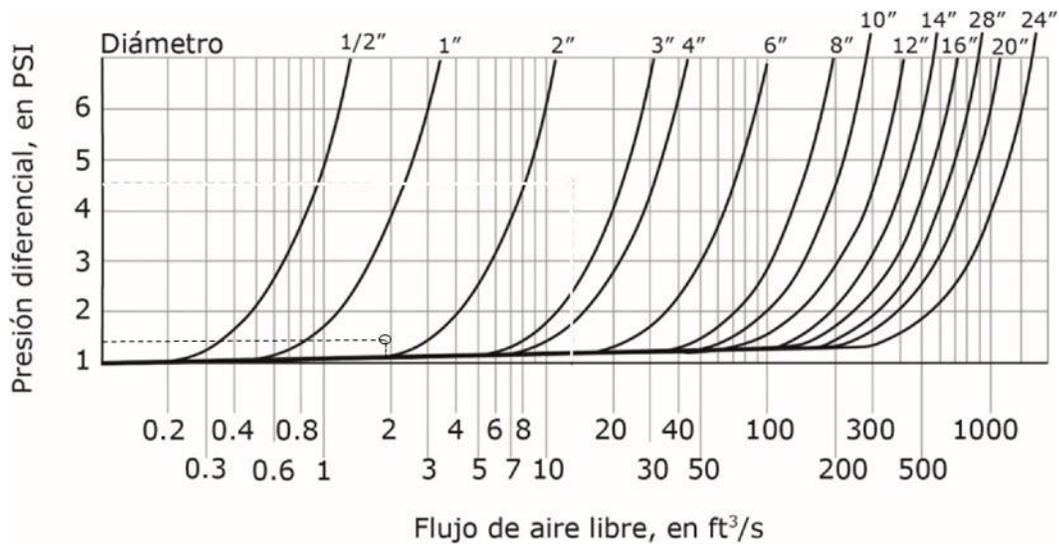


Figura 5.67: Diagrama gasto-carga para válvulas convencionales de admisión y expulsión de aire. (Carmona, L. G., Sánchez, A., Carmona, R. B., 2015).

Tomando como ejemplo la información de la figura 5.67, el diámetro de la VAEA se obtiene de la siguiente manera.

La presión diferencial corresponde a la diferencia de la cota de entrada de aire y el desplante de la VAEA, en psi, por lo que será de 1 mca (1.42 psi). Mientras que el flujo de aire será de 0.048 m³/s (1.7 ft³/s).

El punto se ubicará entre las curvas de diámetro de 1" y 2", como se muestra en la figura 5.67, por lo que para asegurar un ingreso de 0.048 m³/s de aire se optará por el diámetro mayor, que es de 2".

Conforme a los resultados que se obtienen tanto en las piezométricas, el nivel de agua en la cámara de aire, la velocidad del agua en la tubería, así como el volumen de aire que ingresa a través de la VAEA, se puede concluir que el sistema de bombeo queda resuelto colocando una cámara de aire con las características presentadas en la figura 5.55 y una válvula de admisión y expulsión de aire en el cadenamiento 12+720.

Capítulo 6: Comentarios y conclusiones

A partir del uso del programa TRANS en los ejemplos presentados se puede concluir lo siguiente:

1. Previo a realizar una simulación del flujo transitorio con el programa TRANS, el usuario debe analizar la operación en flujo establecido del sistema hidráulico.
2. El usuario debe generar el archivo de datos con la información adecuada que represente tanto las características físicas del sistema hidráulico como las maniobras que desee simular.
3. Una vez realizada una simulación, se debe analizar el comportamiento de todas las estructuras que forman parte del sistema hidráulico para comprobar que éstas operen de manera adecuada. Esto se realiza a través de la información grabada en los archivos de resultados.
4. Es conveniente que el usuario simule primero al sistema sin ningún tipo de dispositivo de control de transitorio antes de proponer alguna solución ya que así podrá contrastar el comportamiento del transitorio para ambos casos (con dispositivo y sin dispositivo). Por lo que se recomienda tener para cada caso un archivo en TRANS con sus respectivos archivos de resultados.
5. Los aspectos más importantes a revisar para cada simulación son las cargas piezométricas, la sobrevelocidad en sentido inverso de los equipos de bombeo, la velocidad del agua en la tubería de conexión y los niveles de agua en los tanques y cámaras de aire. Para el caso particular de la cámara de aire, es importante revisar las sobrepresiones que se generan y tratar de disminuirlas variando el coeficiente de pérdida en la entrada de la cámara o la longitud de la tubería de conexión.
6. La versatilidad del programa TRANS versión *Docencia*, su facilidad de uso y la rapidez con la que realiza las simulaciones lo convierte en una herramienta de cálculo eficaz que puede ser de utilidad a la hora de diseñar dispositivos de control de transitorios en sistemas hidráulicos de conductos a presión.
7. Con la ayuda de este trabajo el estudiante podrá modelar un gran número de sistemas hidráulicos cuyas tuberías trabajen a presión. Aunque también puede servir de guía no solo para los estudiantes si no para cualquier persona que desee usar el programa

en su versión *Sistemas de bombeo*, que incluye una mayor cantidad de elementos y maniobras, ya que los archivos de datos se generan de manera similar a los de la versión *Docencia* y con la información que se almacena en los archivos de resultados se pueden generar gráficas similares a las presentadas.

Bibliografía

1. Abreu, J. (Ed.), Guarga, R. (Ed.), Izquierdo J. (Ed.) (2013). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. España: Sichert.
2. Cafaggi, A. A., Rodal, E. A., Sánchez, A. (2011). *Sistemas de bombeo*. Ciudad Universitaria, D.F. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. Carmona, L. G., Carmona, R. B. (2013). *Manual versión 2010.1.0 del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión Trans.* Ciudad Universitaria, D.F., México: Instituto de ingeniería, UNAM.
4. Carmona, L. G., Castillo G., Carmona, R. B. (2017). A.2.23: Métodos numéricos. Software Golpe de ariete –cámara de oscilación. En *Manual de diseño de obras civiles* (pp. 205 – 216). D.F., México: CFE.
5. Carmona, L. G., Sánchez, A., Carmona, R. B. (2015). Cap. A.2.8: Transitorios hidráulicos en conductos a presión. En *Manual de diseño de obras civiles* (pp. 1 – 180). D.F., México: CFE.
6. Chaudry, M. (2014). *Applied hydraulic Transients*. Columbia, SC, USA: Springer.
7. Guarga, R., Sánchez, J. L., Carmona, R. B., Aguilar, L. (1985). Fascículo III: Transitorios hidráulicos en conducciones de agua a presión. En Guarga, R. Sánchez, J., Carmona, R., Aguilar, L., *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión*. (pp. 1-90). D.F., México: CFE.
8. Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General*. D.F., México: Editorial Limusa.