

**FENÓMENOS TRANSITORIOS EN UNA BIFURCACIÓN POR OPERACIÓN DE
DISPOSITIVOS DE CONTROL.
ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.**

ERIK HARRYSON GELVEZ OJEDA

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C.
2014**

**FENÓMENOS TRANSITORIOS EN UNA BIFURCACIÓN POR OPERACIÓN
DE DISPOSITIVOS DE CONTROL.
ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.**

ERIK HARRYSON GELVEZ OJEDA

**Trabajo presentado como requerimiento de grado de la Especialización
en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Director:
Ing. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C.
2014**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado FENÓMENOS TRANSITORIOS EN UNA BIFURCACIÓN POR OPERACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD, presentado por el ingeniero Erik Harryson Gelvez Ojeda, cumple con los requisitos para optar al título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz
Director del proyecto.

A mi padre, mi madre, mis hermanos y mi novia que con su incondicional cariño y apoyo, me motivaron a superar todas las dificultades que se presentaron durante mi proceso de estudio de posgrado.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	12
1 OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 ANTECEDENTES	14
2.1 ESTUDIO ESPECÍFICOS DE SENSIBILIDAD DE UN SISTEMA.....	15
2.1.1 Estudio de sensibilidad del modelo golpe de ariete por el método FAST.	15
2.1.2 Análisis de sensibilidad Golpe de Ariete máximo	17
3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y ALCANCE DEL ESTUDIO SOBRE TRANSITORIOS EN SISTEMAS DE TUBERÍAS.....	18
4 MARCO TEÓRICO	20
4.1 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE.....	20
4.2 ECUACIONES QUE EXPLICAN EL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE.....	23
4.2.1 Celeridad de la onda.....	25
4.2.2 Método de las características.....	26
4.3 TIEMPO DE CIERRE.....	30
4.3.1 Tiempo de cierre.....	30
4.4 VÁLVULAS.....	31
4.4.1 Esquemas de pérdidas.....	32
4.5 SEPARACIÓN DE COLUMNA.....	34
5 ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO	35
6 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ANALIZAR.....	36
7 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE UN TRANSITORIO.....	37
7.1 CONDICIONES DE FRONTERA.....	38
7.1.1 Nivel en el embalse.....	38
7.1.2 Altura piezométrica en la bifurcación.....	38
7.1.3 Curvas características de las válvulas.....	39
7.2 NUMERO DE SEGMENTOS EN LAS TUBERÍAS.....	41
7.3 INTERVALO DE TIEMPO DE CÁLCULO (ΔT).....	41
8 HERRAMIENTAS DE CÁLCULO del transitorio	42

8.1	HOJA DE CÁLCULO.....	42
8.2	AFT IMPULSE®.....	45
9	JUSTIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	47
9.1	CIERRE SIMULTÁNEO	47
9.2	CIERRE DESFASADO.....	50
10	ESTUDIO DE SENSIBILIDAD.....	52
10.1	CIERRE SIMULTÁNEO CON VÁLVULA DE COMPUERTA.....	52
10.1.1	Cálculos preliminares.	52
10.1.2	Resultados del transitorio.	55
10.2	CIERRE DESFASADO CON VÁLVULA DE COMPUERTA.....	59
10.2.1	Cálculos preliminares.	59
10.2.2	Resultados del transitorio.	60
10.3	CIERRE SIMULTÁNEO CON VÁLVULA DE MARIPOSA.....	67
10.3.1	Cálculos preliminares	67
10.3.2	Resultado del transitorio	68
10.4	CIERRE DESFASADO CON VÁLVULA DE MARIPOSA.....	73
10.4.1	Cálculos preliminares.	73
10.4.2	Resultados del transitorio.	73
10.5	COMPARACIÓN GENERAL ENTRE LOS TIPOS DE VÁLVULAS....	81
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA.....	86
	ANEXOS.....	87

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Parámetros evaluados en el estudio de sensibilidad.	15
Tabla 3.1 Escenarios de cierre evaluados.	19
Tabla 7.1 Propiedades físicas del agua a 1 Atm y 20°C.	37
Tabla 7.2 Propiedades físicas de las tuberías PVC.	38
Tabla 9.1 Coeficiente de caudal utilizados en la simulación de verificación, en el programa AFT Impulse®.	47
Tabla 10.1 Cálculos del K_i de la válvula de compuerta.	53
Tabla 10.2 Cálculos del Δt , para un cierre simultáneo con válvulas de compuerta.	54
Tabla 10.3 Cálculos de las constantes de cálculo, para un cierre simultáneo con válvulas de compuerta.	54
Tabla 10.4 Tiempos de cierre simultáneo evaluados. Válvulas de compuerta.	55
Tabla 10.5 Tiempos de cierre desfasados evaluados. Válvulas de compuerta.	60
Tabla 10.6 Cálculos preliminares para un cierre simultáneo con válvulas de mariposa.	67
Tabla 10.7 Tiempos de cierre simultáneo evaluados. Válvulas de mariposa.	68
Tabla 10.8 Tiempos de cierre desfasados evaluados. Válvulas de mariposa.	74

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Esquema analizado.	16
Figura 2.2 Esquema del sistema de bombeo analizado.	17
Figura 4.1 Interpretación física del golpe de ariete debido a un cierre instantáneo.	21
Figura 4.2 Variación de la presión en la válvula sin efecto de la fricción.	23
Figura 4.3 Variación de la presión en la válvula con efecto de la fricción	23
Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre para el planteamiento de la ecuación de movimiento.....	24
Figura 4.5 Volumen de control utilizado para la deducción de la ecuación de continuidad.....	25
Figura 4.6 Malla rectangular para la solución por el método de las características.....	27
Figura 4.7 Esquemas de las características en la bifurcación.	30
Figura 4.8 Tipos de válvulas.	31
Figura 4.9 Variación de la relación de área para diferentes tipos de válvulas.	32
Figura 4.10 Separación de columna aguas abajo de una válvula, luego de un cierre súbito.	34
Figura 6.1 Esquema del sistema de distribución analizado.	36
Figura 7.1 Curva de descarga para una válvula de compuerta con descarga libre.	39
Figura 7.2 Curva de descarga para una válvula de mariposa próxima a una descarga libre.	40
Figura 8.1 Página de datos de entrada de la hoja de cálculo.	43
Figura 8.2 Resultados del transitorio.	44
Figura 8.3 Espacio de trabajo en AFT Impluse®.	45
Figura 8.4 Definición de las características de la válvula.....	46
Figura 8.5 Definición del Δx y el Δt	46
Figura 9.1 Esquema y principales resultados del modelo en AFT Impulse®.	47
Figura 9.2 Variación del caudal obtenida por las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre simultaneo.....	48
Figura 9.3 Variación de la altura piezométrica en la descarga usando las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre simultaneo.....	49
Figura 9.4 Desviación de los resultados de la hoja cálculo respecto a AFT Impulse®, para una maniobra de cierre simultaneo.....	49
Figura 9.5 Variación del caudal obtenida por las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre desfasada.	50
Figura 9.6 Variación de la altura piezométrica en la descarga usando las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre desfasada.....	50

Figura 9.7 Desviación de los resultados de la hoja cálculo respecto a AFT Impulse®, para una maniobra de cierre simultaneo.....	51
Figura 10.1 Esquema del modelo en EPANET 2.0®	53
Figura 10.2 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de compuerta.....	56
Figura 10.3 Envoltentes de piezométricas mínimas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	57
Figura 10.4 Envoltentes de piezométricas máximas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	58
Figura 10.5 Envoltentes de alturas piezométricas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el embalse y las válvulas.	59
Figura 10.6 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de compuerta.....	61
Figura 10.7 Comportamiento típico de la altura piezométrica en los puntos clave del sistema para cierre desfasado. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías.....	62
Figura 10.8 Envoltentes de piezométricas mínimas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	63
Figura 10.9 Envoltentes de piezométricas mínimas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	64
Figura 10.10 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	65
Figura 10.11 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	65
Figura 10.12 Envoltentes de alturas piezométricas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.	66
Figura 10.13 Envoltentes de alturas piezométricas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.	67
Figura 10.14 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de mariposa.	70
Figura 10.15 Envoltentes de piezométricas mínimas para cierres simultáneos. Válvulas de de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	71

Figura 10.16 Envolventes de piezométricas máximas para cierres simultáneos. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	72
Figura 10.17 Envolventes de alturas piezométricas para cierres simultáneos. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.....	73
Figura 10.18 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de mariposa.....	75
Figura 10.19 Comportamiento típico de la altura piezométrica en los puntos clave del sistema, para cierre desfasado. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías.....	76
Figura 10.20 Envolventes de piezométricas mínimas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	77
Figura 10.21 Envolventes de piezométricas mínimas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	78
Figura 10.22 Envolventes de piezométricas máximas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	79
Figura 10.23 Envolventes de piezométricas máximas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.....	79
Figura 10.24 Envolventes de alturas piezométricas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.....	80
Figura 10.25 Envolvente de alturas piezométricas en diferentes puntos de medición de la tubería No 3, para cierre desfasado con válvulas de mariposa.....	81
Figura 10.26 Piezométricas máximas y mínimas encontrados para las diferentes maniobras de cierre evaluadas. Tiempo de cierre Instantáneo (1T).	82
Figura 10.27 Piezométricas máximas y mínimas encontrados para las diferentes maniobras de cierre evaluadas. Tiempo de cierre largos.....	83

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Memorias de cálculo para cierre simultáneo, válvulas de compuerta y diferentes tiempos de cierre.

Anexo B. Memorias de cálculo para cierre desfasado, válvulas de compuerta y diferentes tiempos de cierre.

Anexo C. Memorias de cálculo para cierre simultáneo, válvulas de mariposa y diferentes tiempos de cierre.

Anexo D. Memorias de cálculo para cierre desfasado, válvulas de mariposa y diferentes tiempos de cierre.

INTRODUCCIÓN

El golpe de ariete es un fenómeno que se presenta en los sistemas de tuberías a presión, cuando se cambian súbitamente las condiciones de flujo por el accionamiento de válvulas, bombas, turbinas o cualquier otro elemento que modifique los niveles de energía y el caudal que se mueve por el sistema. Generalmente está asociado a fuertes cambios de presión que producen altos niveles de ruido y daños en los ductos, a los cuales se les debe la denominación del fenómeno.

En el presente documento se incluye un análisis de sensibilidad para el golpe de ariete producido por el cierre de las válvulas que controlan el flujo en un sistema de distribución; este, a su vez, está compuesto por un tanque de almacenamiento, una tubería principal que sale de este y se bifurca, para posteriormente descargar libremente. Al final de cada ramal se encuentra una válvula. La sensibilidad analizada correspondió al comportamiento del sistema ante diferentes maniobras de cierre, con diferentes tiempos de accionamiento y diferentes tipos de válvulas.

Inicialmente se realizó una revisión teórica del concepto del golpe de ariete y del esquema numérico seleccionado para realizar el cálculo del flujo no permanente (método de las características). Además se verificaron algunos estudios que habían realizado un análisis de sensibilidad a otros tipos de sistemas.

En segundo lugar se presenta la metodología utilizada para la elaboración del estudio de sensibilidad. De igual forma, se procede a presentar los criterios y supuestos realizados para la construcción del modelo con la ayuda del método de las características y una versión de prueba del programa AFT Impulse®. Los resultados encontrados por las dos herramientas de cálculo son comparadas para determinar la veracidad de la información y de esta forma reducir el margen de incertidumbre del estudio.

Finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos para cada maniobra de cierre y se formulan las conclusiones y recomendaciones.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis de sensibilidad del fenómeno del golpe de ariete en un sistema de distribución con una bifurcación, para dos maniobras cierre, cada una con diferentes tiempos de cierre y dos tipos de válvulas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una hoja de cálculo que permita estimar las condiciones de flujo en el sistema, durante el transitorio.
- Determinar cuál de las dos maniobras de cierre analizadas (simultánea o desfasada) produce las condiciones más críticas de sobre-presión y depresión en el sistema evaluado.
- Definir qué tipo de válvula, de las utilizadas para la simulación, es más adecuada para un sistema de distribución similar al analizado, de acuerdo con las presiones pico y valle estimadas.
- Plantear una metodología que permita definir un tiempo de cierre que minimice los efectos de la maniobra en el sistema de distribución.
- Establecer para cuál de las tres variables analizadas, el sistema es más sensible.

2 ANTECEDENTES

El fenómeno del golpe de ariete ha sido estudiado ampliamente desde el siglo XIX. A continuación se presenta un breve resumen de la historia del estudio del golpe de ariete¹.

Fue estudiado por primera vez por Menabrea (aunque generalmente se concede esta distinción a Michaud). Michaud examinó el uso de cámaras de aire y válvulas de seguridad para el control de golpe de ariete. Cerca del final del siglo XIX, los investigadores como Weston, Carpenter y Frizell intentaron desarrollar expresiones que relacionaran los cambios de presión y velocidad en una tubería. Frizell desarrollo con éxito esta labor y discutió los efectos de los ramales y reflexión de ondas sucesivas de regulación de la velocidad de la turbina. Un trabajo similar fue desarrollado por sus contemporáneos Joukowsky y Allievi, sin embargo. Joukowsky produjo la mejor ecuación conocida en la teoría del flujo de transitorios, por lo que a menudo se llama la "ecuación fundamental del golpe de ariete". También estudió la reflexiones de la onda de un ramal abierto, el uso de cámaras de aire, aumento tanques y válvulas de seguridad tipo resorte.

Allievi desarrolló una teoría general que contiene los principales principios del golpe de ariete y mostró que el término convectivo en la ecuación de momento era insignificante. Él introdujo dos importantes parámetros adimensionales que son ampliamente utilizados para caracterizar tuberías y el comportamiento de la válvula. Allievi también produjo tablas para el aumento de presión en una válvula de cierre uniforme. Otras mejoras a las ecuaciones de golpe de ariete aparecieron en Jaeger, Wood, Rich, Parmakian, Streeter y Lai, y Streeter and Wylie. Sus esfuerzos combinados han dado lugar a las ecuaciones clásicas de masa (Ecuación 4.2) e impulso (Ecuación 4.1) para flujos unidimensionales de golpe de ariete.

¹ GUIDAOUI, Mohamed, et al. A Review of Water Hammer Theory and Practice. En: ASME : Applied Mechanics Reviews. [En línea]. Vol. 58, No 1, (2005); p. 2. [Consultado 3 ago. 2013]. Disponible en: < <http://appliedmechanicsreviews.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1398213>>

2.1 ESTUDIO ESPECÍFICOS DE SENSIBILIDAD DE UN SISTEMA.

En esta parte del documento se presentan dos análisis específicos de sensibilidad, realizados a diferentes tipos de redes.

2.1.1 Estudio de sensibilidad del modelo golpe de ariete por el método FAST.

Éste documento fue elaborado por Kaliatka, Kopustinskas y Vaisnoras² y consistió en determinar la influencia de los parámetros mostradas en la Tabla 2.1 en el cálculo de los resultados del cálculo del golpe de ariete, para el esquema presentado en la Figura 2.1, que corresponde al esquema utilizado en una prueba experimental del fenómeno realizado en el Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology (UMSICHT), utilizando el programa RELAP5/Mod3.3®.

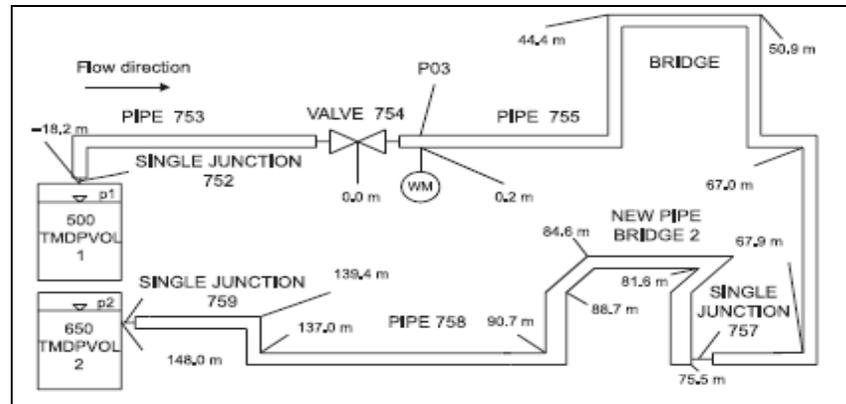
Tabla 2.1 Parámetros evaluados en el estudio de sensibilidad.

Parámetro	Rango de valores	
	Mínimo	Máximo
Altura de presión en la bomba (Pa)	3,871	105
Temperatura del agua (°C)	18,9	23,9
Tasa de cierre de válvula (s ⁻¹)	17,52	30,48
Rugosidad (m)	0,00002	0,00003
Coeficiente de pérdida en cada nodo de la tubería 753	0,04476	0,08313
Coeficiente de pérdida en cada nodo de la tubería 755	0,01459	0,02709
Coeficiente de pérdida en cada nodo de la tubería 758	0,00695	0,0129

Fuente: Kaliatka, et al, Estudio de sensibilidad del modelo golpe de ariete por el método FAST

² KALIATKA, Algirdas; KOPUSTINSKAS, Vytis; VAIŠNORAS, Mindaugas. Wather Hammer Model Sensitivity Study by the FAST Method. En: Lithuanian Academy of Sciences Publishers: Energetika,. [En línea]. T. 55 p.13-19 (2009). [Consultado 1 ago. 2013]. Disponible en: <<http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2009/1/13-19.pdf>>

Figura 2.1 Esquema analizado.



Fuente: Estudio de sensibilidad del modelo golpe de ariete por el método FAST.

El trabajo consistió en aplicar el método de la Prueba de Sensibilidad de Amplitud de Fourier a los resultados obtenidos con el programa RELAP5/Mod3.3®. A partir de éste análisis se encontró que:

- El coeficiente de pérdida de energía en la unión aguas abajo la válvula de acción rápida es el parámetro con la mayor contribución a la varianza de la presión pico estimada. La implicación práctica de este resultado es que más conocimiento preciso del coeficiente de pérdida de energía de flujo en los componentes de la tubería aguas abajo de la válvula de acción rápida permitirían a reducir más eficazmente la incertidumbre de la presión calculada valor pico.
- En segundo lugar se encontró con mayor grado de afectación a la rugosidad de la pared y la presión a la bomba de parámetros de cabecera cuya importancia es similar, pero significativamente más bajo que el del coeficiente de pérdida de unión en el componente de la tubería aguas abajo de la válvula de acción rápida.
- El análisis ha indicado que las interacciones entre los parámetros no son muy fuertes, sin embargo, en términos cuantitativos, son casi de igual magnitud todos los parámetros. Como consecuencia, ninguno de los parámetros puede ser excluido o considerar insignificante su efecto en los resultados del modelo, aunque algunas variables tiene mayor importancia.

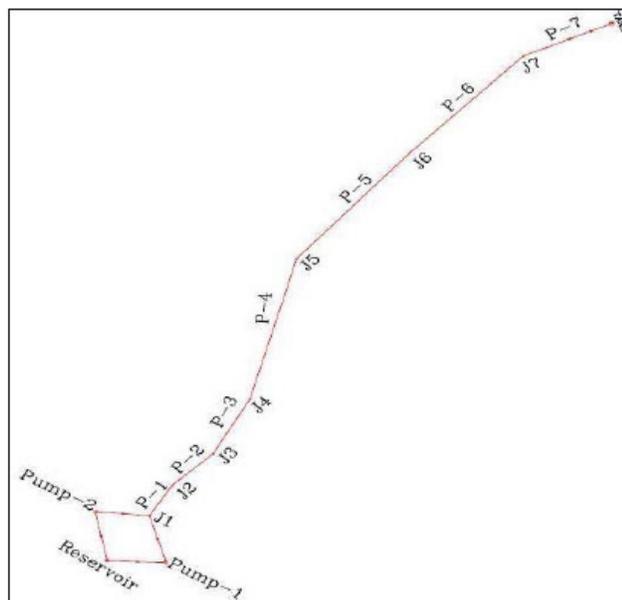
2.1.2 Análisis de sensibilidad Golpe de Ariete máximo

Este trabajo fue desarrollado por Emadi y Solemani³. El estudio se centra en determinar la importancia de cada variable de entrada solicitada por el Software Hammer® para estimar el máximo golpe de ariete para el esquema analizado, que corresponde a la estación de bombeo *Kuhrang* que se caracteriza por la descarga total de 200 litros por segundo, una altura dinámica de 194 metros, 1,5 kilómetros de ductos de transporte de acero y transporta agua para *Cheshme Morvarid* para el riego agrícola.

Los parámetros analizados incluyen la temperatura del agua, la tubería tipo, grosor y diámetro, revoluciones por minuto del motor eléctrico y la potencia, momento de inercia del motor eléctrico y la bomba.

Las condiciones en flujo permanente fue modelado usando Software WaterGEMS® y luego transferidos a Hammer®. Como resultado de este estudio se encontró que los parámetros a los que el golpe de ariete es más sensible son el momento de inercia de la bomba y electromotor, diámetro, tipo y espesor de la tubería y la temperatura agua, respectivamente.

Figura 2.2 Esquema del sistema de bombeo analizado.



³ EMADI, Jalil; SOLEMANI, Abbas. Maximum Wather Hammer Sensitivity Analysis. En: World Academy of Science, Engineering and Technology,. [En línea]. Vol. 49 (2011). [Consultado 1 ago. 2013]. Disponible en: < <http://waset.org/publications/13798>>

3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y ALCANCE DEL ESTUDIO SOBRE TRANSITORIOS EN SISTEMAS DE TUBERÍAS

Tal como se describió en el numeral 1.1 el objetivo principal del presente trabajo es realizar un análisis de sensibilidad del fenómeno del golpe de ariete en un sistema de distribución con una bifurcación, para dos maniobras cierre, cada una con diferentes tiempos de cierre y para dos tipos de válvulas. El sistema de distribución que se analiza corresponde al mostrado en la Figura 2.1.

Las operaciones de cierre de válvulas, de forma voluntaria o por una mala manipulación de estas, es la principal razón por el cual se presentan las sobrepresiones en la redes de distribución. Con base en esta premisa, se enfocó el presente estudio a valorar los efectos del procedimiento cierre en dos casos extremos: cuando se realiza de forma simultánea la maniobra en las dos válvulas y cuando la segunda válvula se acciona inmediatamente después que la primera finaliza su operación. Los demás escenarios de desfase no se tuvieron en cuenta considerando que la superposición de las ondas no es tan intensa, ya que el choque de frentes no se produciría en los picos y valles respectivos de presión.

Las maniobras de cierre se evaluaron suponiendo el uso de válvulas de compuerta o válvulas de mariposa. Solo se analizaron estos dos tipos, ya que se solo se obtuvo la información correspondiente a los coeficientes de descarga para diferentes aperturas, en la condición de descarga libre, de una fuente confiable, para las clases de válvulas mencionadas.

Cada combinación de tipo de cierre, con cada tipo de válvula, se simuló para diferentes tiempos de maniobra. Para definir los tiempos mencionados, se utilizó como base el periodo del sistema ($T=2L/a$) tantas veces como fuera necesario para identificar el comportamiento y obtener la información necesaria para realizar las recomendaciones. En la

Tabla 3.1 se resumen los escenarios que se evaluaron para la realización del documento; por lo tanto el análisis de sensibilidad se limita a estos. En el caso de las maniobra simultánea se simularon tiempos adicionales, ya que el comportamiento presentó una irregularidad que se explica en el numeral 10.2.2.

Tabla 3.1 Escenarios de cierre evaluados.

Tipo de cierre	Tipo de válvula	Tiempo de cierre
Simultaneo	Compuerta - Mariposa	1T
		2T
		3T
		4T
		6T
		8T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
		100T
Desfasado	Compuerta - Mariposa	1T
		2T
		3T
		4T
		5T
		6T
		7T
		8T
		9T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
100T		

4 MARCO TEÓRICO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE.

El fenómeno del golpe de ariete consiste en un caso particular de flujo no permanente en tuberías presurizadas, en el cual los cambios de presión y velocidad de flujo entre cada instante de tiempo son muy grandes. Existen diferentes maniobras o situaciones que inducen la formación de éste tipo de flujo transitorio, según CHAUDRY⁴ las principales causas son:

- La apertura, cierre o mal funcionamiento de las válvulas en una tubería.
- Iniciar o detener el funcionamiento de las bombas en un sistema de bombeo.
- Puesta en marcha de una turbina hidráulica, la aceptación o el rechazo de carga.

Como el alcance del presente documento está limitado a maniobras de cierre de válvulas en un sistema de distribución, solo se presenta la descripción completa del golpe de ariete por esta causa, aclarando que las demás tienen un comportamiento similar.

En la

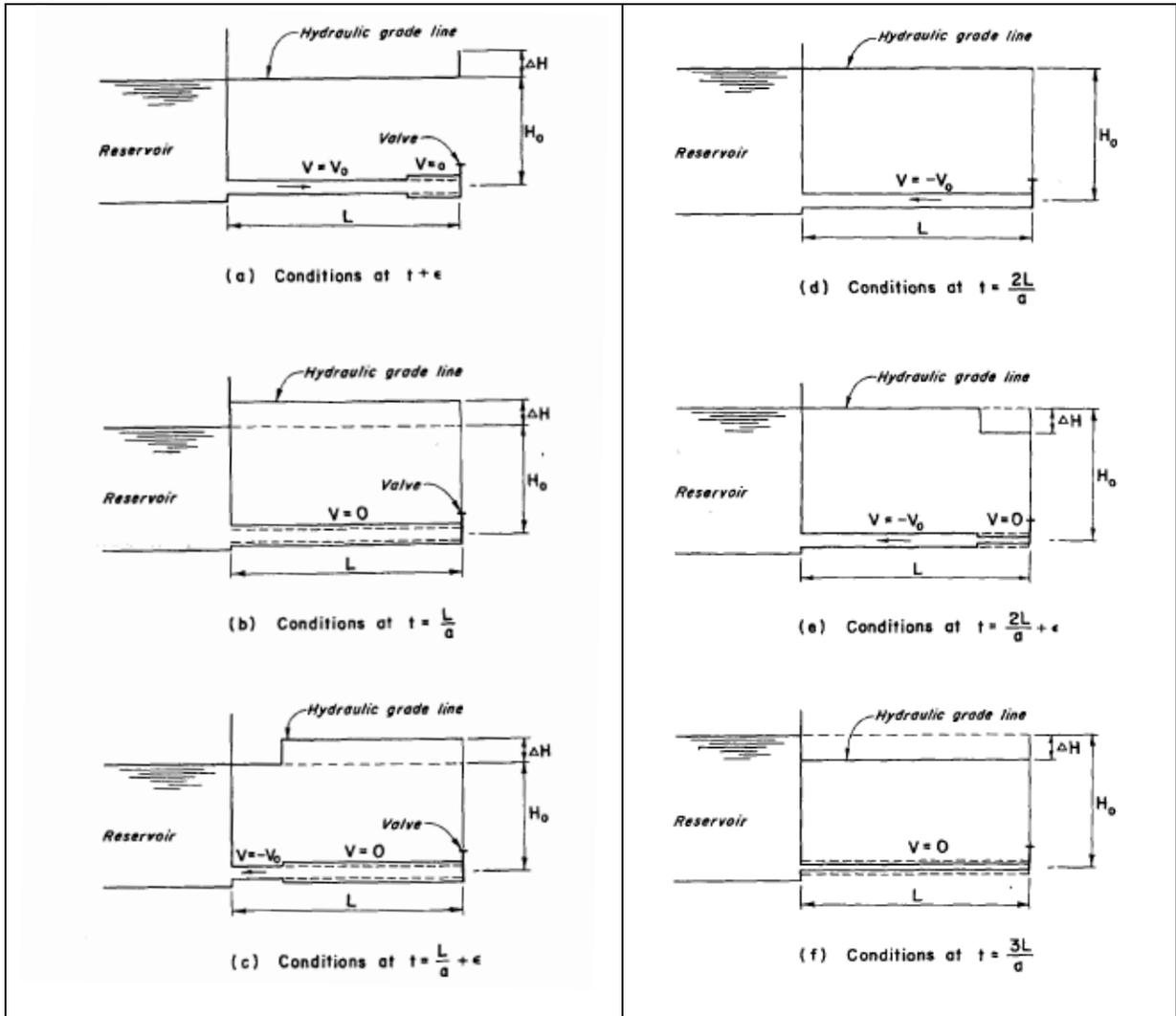
Figura 4.1 se muestra esquemáticamente el fenómeno del golpe de ariete, el cual se describe a continuación:

- En el instante cero el conducto el sistema se encuentra en condiciones de flujo permanente. Es decir, el nivel de agua constante en el depósito (suponiendo un depósito de gran tamaño), la válvula al final de la tubería está abierta y la velocidad de flujo V_0 en la tubería.
- Un instante más tarde ($t=t_0+\epsilon$) se ha cerrado la válvula completamente, por lo cual la velocidad en la cercanías a ésta pasa de un valor V_0 a 0, la energía cinética se convierte en energía potencial aumentando la presión en un valor ΔH , el diámetro se ha expandido a un valor ΔD , el líquido se ha comprimido a un valor $\rho+\Delta\rho$ y se desplaza una onda de presión positiva en dirección al depósito con velocidad "a".

⁴ CHAUDRY, Hanif. Applied Hydraulic Transients. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. p. 18.

- Luego de un tiempo $t_0 + \frac{L}{a}$ la onda llega al inicio de la tubería haciendo que todo el conducto experimente las condiciones descritas en el instante $t_0 + \epsilon$.

Figura 4.1 Interpretación física del golpe de ariete debido a un cierre instantáneo.



Fuente: Chaudry, Applied Hydraulic Transients, p. 12-13.

- Considerando que el nivel del agua en el depósito es constante, la presión en la tubería es mayor que la inicial y el fluido está en condiciones de desequilibrio. Esta situación produce una conversión de energía potencial a cinética, originándose una onda de descompresión que se mueve hacia la válvula, mientras que el flujo lo hace hacia el depósito. La onda de

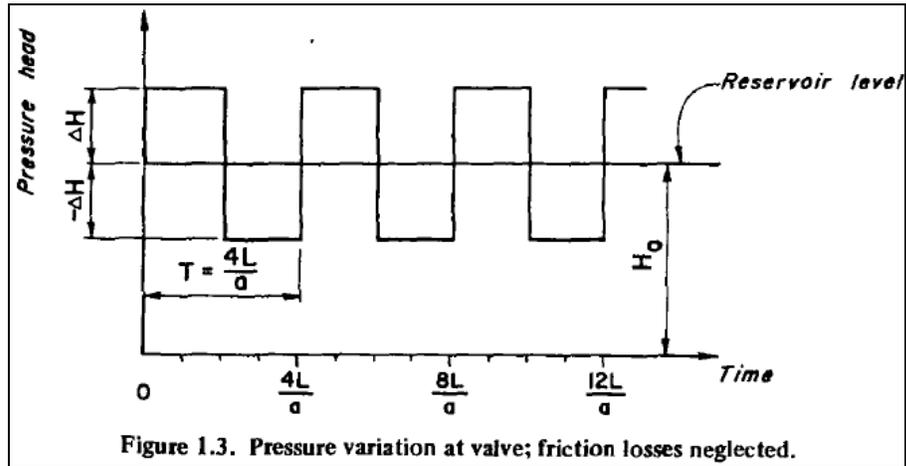
descompresión que viaja hacia la válvula con celeridad “a”, va dejando la tubería en las mismas condiciones estáticas iniciales.

- Después de transcurrido $t_0 + 2\frac{L}{a}$ todo el conducto ha vuelto a las condiciones anteriores al cierre, con la diferencia que el flujo tiene una velocidad igual V_0 .
- Como en el instante $t_0 + 2\frac{L}{a} + \epsilon$ la velocidad de flujo no se puede propagar aguas abajo de la válvula se inicia un proceso similar al presentado en los momentos posteriores al cierre. En las proximidades a la válvula la energía cinética se convierte en energía potencial ($V=0$) disminuyendo la presión en un valor ΔH , el diámetro se ha comprimido a un valor ΔD , el líquido se ha comprimido a un valor $\rho + \Delta\rho$ y se desplaza una onda de presión negativa en dirección al depósito con velocidad a.
- Luego de un tiempo $t_0 + 3\frac{L}{a}$ la onda llega al inicio de la tubería haciendo que todo el conducto experimente las condiciones descritas en el instante $t_0 + 2\frac{L}{a} + \epsilon$.
- Para un tiempo $t_0 + 3\frac{L}{a} + \epsilon$ debido al desequilibrio presentado entre la presión en la tubería y el nivel del tanque, se inicia nuevamente una onda descompresión. La diferencia entre ésta y la anterior consiste en que la velocidad del flujo tendrá la misma dirección de la onda.
- Luego de un tiempo $t_0 + 4\frac{L}{a}$ la tubería nuevamente ha regresado a sus condiciones originales de escurrimiento y se finaliza el ciclo de viaje de la onda.

Además, tal como lo expresa Chaudry⁵, si no existiera una fuerza externa que le hiciera resistencia a las fuerzas que producen el fenómeno, el ciclo se extendería indefinidamente (véase Figura 4.2), debido a la acción, principalmente, de la fuerzas de fricción la magnitud de las presiones y velocidades se disminuyen en cada ciclo hasta alcanzar el equilibrio, como se muestra en la Figura 4.3.

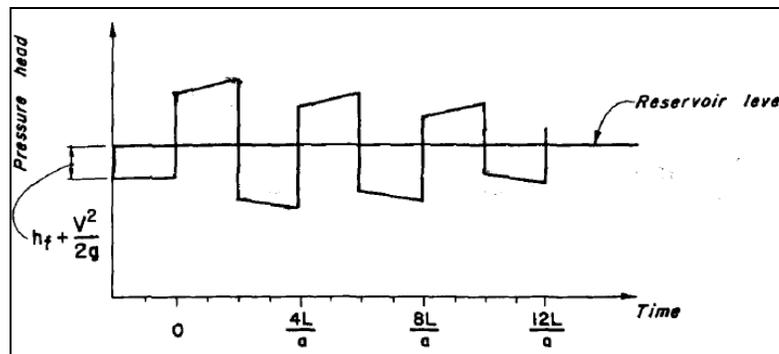
⁵ CHAUDRY, Op. cit., p. 15-16.

Figura 4.2 Variación de la presión en la válvula sin efecto de la fricción.



Fuente: Chaudry, Applied Hydraulic Transients, p 15

Figura 4.3 Variación de la presión en la válvula con efecto de la fricción



4.2 ECUACIONES QUE EXPLICAN EL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE.

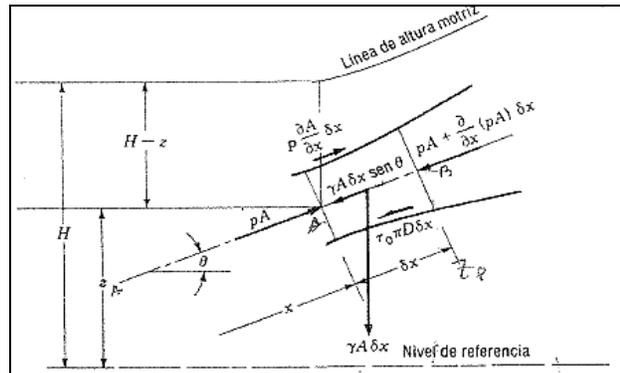
El conjunto de ecuaciones que explican el golpe de ariete son expresiones derivadas de la aplicación de los principios de movimiento y continuidad.

Streeter y Wylie⁶, en el libro de Mecánica de los Fluidos, deduce que la expresión de movimiento aplicada a flujos transitorios en tuberías (Véase Figura 4.4), corresponde a la Ecuación 4.1.

⁶ STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin. Mecánica de los fluidos. Octava edición. Ciudad de México: McGraw Hill, 1988. p. 534-537

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre para el planteamiento de la ecuación de movimiento.



Fuente: Streeter y Wylie, Mecánica de los fluidos, p. 534.

Donde:

- $\frac{\partial V}{\partial t}$ Es la variación de la velocidad respecto al tiempo.
- $\frac{\partial p}{\partial x}$ Es la variación de la presión respecto al espacio.
- f Es el factor de fricción de la tubería.
- V Es la velocidad de flujo.
- D Es el diámetro de la tubería.
- G Es la aceleración de la gravedad.
- ρ Es la densidad del fluido
- θ Es el ángulo entre el eje de la tubería y la horizontal.

Para encontrar esta expresión, se realizaron las siguientes simplificaciones:

- El factor de fricción es el mismo para los flujos a régimen permanente y no permanente.
- La variación de la velocidad respecto al espacio es mucho más pequeña que la variación de la velocidad respecto al tiempo, por lo cual se puede despreciar.

$$\frac{\partial V}{\partial t} \gg \frac{\partial V}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} \approx 0$$

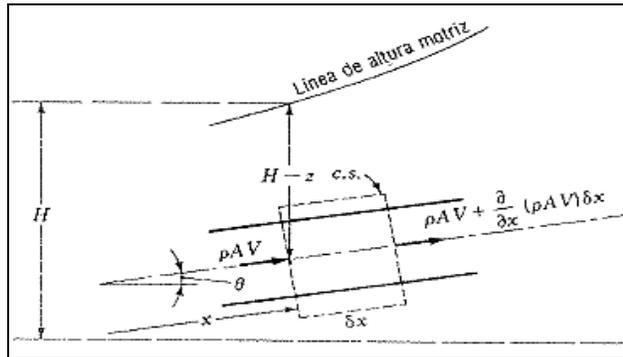
- El fluido que se transporta es comprensible y la tubería es elástica.

De igual forma, los autores anteriormente citados, manifiestan que el principio de continuidad aplicado al fenómeno del golpe de ariete (Véase Figura 4.5) se puede expresar como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Ecuación 4.2

Figura 4.5 Volumen de control utilizado para la deducción de la ecuación de continuidad.



Fuente: Streeter y Wylie, Mecánica de los fluidos, p. 535

Donde:

$\frac{\partial V}{\partial x}$ Es la variación de la velocidad respecto al espacio.

$\frac{\partial p}{\partial t}$ Es la variación de la presión respecto al tiempo.

α Es la celeridad de la onda, determinada como se muestra en el numeral 4.2.1.

De forma similar a la ecuación de cantidad de movimiento, para encontrar la expresión correspondiente al principio de continuidad, se realizaron las siguientes simplificaciones:

- La variación de la presión respecto al espacio es mucho más pequeña que la variación de la presión respecto al tiempo, por lo cual se puede despreciar.

$$\frac{\partial p}{\partial t} \gg \frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} \approx 0$$

- El fluido que se transporta es compresible y la tubería es elástica.

4.2.1 Celeridad de la onda

La celeridad de la onda es la velocidad a la que se propaga el fenómeno transitorio, en dirección aguas arriba o aguas abajo (véase numeral 4.1), en el

ducto. Para determinar el valor de este parámetro se utiliza la Ecuación 4.3 cuando se cuenta con una tubería de pared delgada sin anclajes⁷.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \left[1 + \left(\frac{K}{E} \right) \left(\frac{D}{e} \right) \right]} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

- K Es el módulo de elasticidad volumétrica del fluido.
- ρ Es la densidad del fluido.
- E Es el módulo de la elasticidad de *Young* del material de la tubería.
- ν Es la relación de *Poisson* del material de la tubería.
- R_e Es el radio externo de la tubería.
- R_i Es el radio interno de la tubería.

4.2.2 Método de las características.

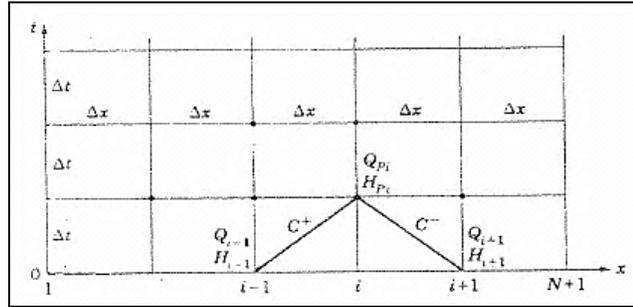
Debido a la naturaleza del el sistema de ecuaciones diferenciales compuesto por la Ecuación 4.1 y la Ecuación 4.3 resulta muy complicado encontrar una solución explícita para la presión o la velocidad. Sin embargo se han desarrollado diferentes metodologías que permiten una aproximación al comportamiento del fenómeno del golpe de ariete: Método aritmético, gráfico, de las características, diferencias finitas, esquemas implícitos, adaptaciones de diferentes autores de los diferentes métodos, etc.

En el presente documento solo se muestran el método utilizado para realizar el análisis propuesto.

El método de las características es una técnica numérica que permite trabajar con ecuaciones explícitas, que requieren conocer las condiciones de flujo en el instante anterior para estimar el caudal y la altura piezométrica en el instante, como se muestra en la Figura 4.6. La característica positiva (C^+) solo es válida para estimar Q_i y H_i a partir de las condiciones en el tiempo y espacio anterior (Q_{i-1} , H_{i-1}), mientras que característica negativa (C^-) solo es válida para estimar Q_i y H_i a partir de las condiciones de tiempo anterior y espacio posterior (Q_{i+1} , H_{i+1}).

⁷ CHAUDRY, Op. cit, p. 36-37

Figura 4.6 Malla rectangular para la solución por el método de las características.



Fuente: Streeter y Wylie, Mecánica de los fluidos, p. 539

En el presente documento se adoptó la solución planteada por Streeter y Wylie⁸ por la facilidad que implica su aplicación con una hoja de cálculo. Para encontrar el sistema de ecuaciones que conforman el método, se combinan la Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2 utilizando un multiplicador desconocido λ ($L=L_1+\lambda L_2$), como se muestra en la Ecuación 4.4.

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \lambda \left(\frac{1}{\rho \lambda} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) + g \sin \theta + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Teniendo en cuenta que la Ecuación 4.4 solo se satisface si $\lambda = \pm 1/\rho a$, es decir:

$$\frac{dx}{dt} = \pm a$$

Se tiene que, en términos de la altura de la piezométrica y el caudal, la característica positiva se puede expresar como la Ecuación 4.5 y la negativa como la Ecuación 4.6.

$$C^+: \quad H_i = C_P - B_P Q_i \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$C^-: \quad H_i = C_N + B_M Q_i \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:

H_i Es la altura piezométrica en el punto deseado.

Q_i Es la caudal en el punto deseado.

C_P Es un coeficiente estimado con la Ecuación 4.7

⁸ STREETER y WYLIE, Op. cit, p. 537-540

$$C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

B_p Es un coeficiente estimado con la Ecuación 4.8

$$B_p = B + R|Q_{i-1}| \quad \text{Ecuación 4.8}$$

C_M Es un coeficiente estimado con la Ecuación 4.9

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

B_M Es un coeficiente estimado con la Ecuación 4.10

$$B_M = B + R|Q_{i+1}| \quad \text{Ecuación 4.10}$$

H_{i-1}, H_{i+1} Es la altura piezométrica aguas arriba y abajo, respectivamente, en el tiempo anterior.

Q_{i-1}, Q_{i+1} Es la caudal aguas arriba y abajo, respectivamente, en el tiempo anterior.

B Es un coeficiente como se muestra en la Ecuación 4.11.

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

R Es un coeficiente como se muestra en la Ecuación 4.12.

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

A Es la sección transversal interna de la tubería.

g Es la aceleración de la gravedad.

Entonces para un punto cualquiera en las secciones interiores de la malla se puede estimar el caudal con la Ecuación 4.13 y la altura piezométrica con la Ecuación 4.14.

$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{B_D + B_M} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$H_i = C_P - B_P Q_i \quad \text{Ecuación 4.14}$$

- **Condiciones de frontera**

Para los puntos finales de las tuberías es necesario definir las condiciones hidráulicas de forma diferente. En el esquema analizado en el presente estudio se establecieron tres fronteras: Nivel constante en el depósito, la bifurcación y las válvulas en la descarga.

- Nivel constante en el depósito: El parámetro conocido en este caso corresponde a la altura de agua en el tanque, lo que constituirá el punto inicial de la línea piezométrica, si se desprecian las pérdidas por entrada en la tubería.
- Bifurcación: En este caso es necesario que se satisfaga la ecuación de continuidad y que se suponga una altura piezométrica común al final de cada tubería (Sin pérdidas menores)⁹. En este caso se obtiene, a partir de la característica positiva para la tubería principal y de la negativa para las tuberías después de la bifurcación, la altura piezométrica en la unión mediante la Ecuación 4.15, mientras que el caudal para los ductos 1, 2 y 3 se calculan con la Ecuación 4.16, Ecuación 4.17 y Ecuación 4.18, respectivamente.

$$H_u = \frac{C_{P_1}/B_{P_1} + C_{M_2}/B_{M_2} + C_{M_3}/B_{M_3}}{\frac{1}{B_{P_1}} + \frac{1}{B_{M_2}} + \frac{1}{B_{M_3}}} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

$$Q_1 = -\frac{H_u}{B_{P_1}} + \frac{C_{P_1}}{B_{P_1}} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

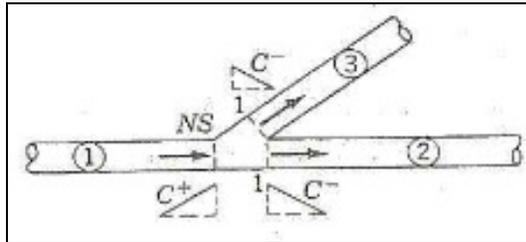
$$-Q_2 = -\frac{H_u}{B_{M_2}} + \frac{C_{M_2}}{B_{M_2}} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

⁹ STREETER y WYLIE, Op. cit, p. 544

$$-Q_3 = -\frac{H_v}{B_{M_3}} + \frac{C_{M_3}}{B_{M_3}} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde, el subíndice 1 corresponde a la tubería principal y los subíndices 2 y 3 a las tuberías aguas abajo de la bifurcación, como se muestra en la Figura 4.7

Figura 4.7 Esquemas de las características en la bifurcación.



Fuente: Streeter y Wylie, Mecánica de los fluidos, p. 544

- Válvula aguas abajo: Considerando que la válvula trabaja como un orificio y teniendo en cuenta que la característica que se puede utilizar en este caso es la positiva, el caudal que pasa por ésta se calcula mediante la Ecuación 4.19 y la altura piezométrica con la Ecuación 4.5.

$$Q_i = -gB_p (C_d A_v)^2 + \sqrt{[gB_p (C_d A_v)^2]^2 + (C_d A_v)^2 2g(Z_v - C_p)} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde:

Z_v Es la cota del eje de la válvula.

4.3 TIEMPO DE CIERRE.

4.3.1 Tiempo de cierre.

Período o fase de la tubería es el tiempo que la onda de sobrepresión tarda en ir y volver al punto en que se originó el fenómeno. Para tuberías que no cuentan con la presencia de una chimenea de equilibrio, el periodo de la tubería está dado por la Ecuación 4.20.

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

Ecuación 4.20

Donde:

T Es el período o fase de la tubería.

L Es la longitud de la conducción

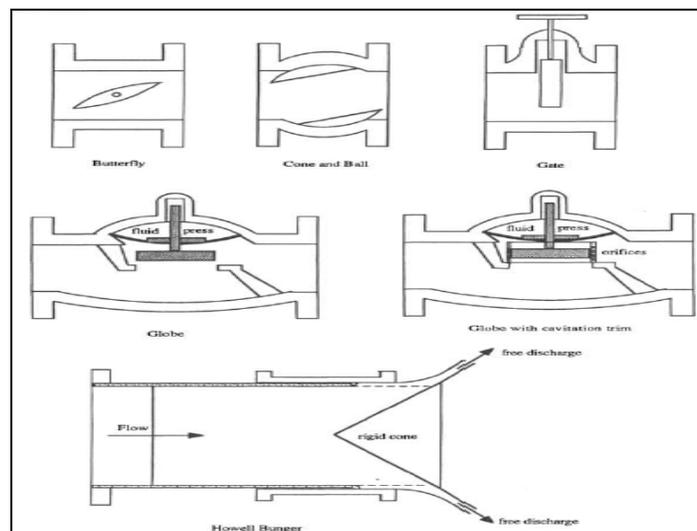
El tiempo de cierre, o de apertura, de la válvula es un factor importante que determina la magnitud del efecto del golpe de ariete. Si la maniobra de operación de la válvula es menor que el periodo de la tubería ($t < T$) ésta se considera que es rápida o brusca; si por el contrario la operación de válvula tarda un tiempo mayor que el periodo de la tubería ($t > T$) se considera que es lenta.

4.4 VÁLVULAS

Las válvulas son elementos físicos que permiten controlar y/o regular el flujo del agua en una tubería. Existen varios tipos: de compuerta, mariposa, globo, entre otras. Lo que diferencia a una de las otras es el mecanismo con el cual se hace la regulación del caudal (véase Figura 4.8).

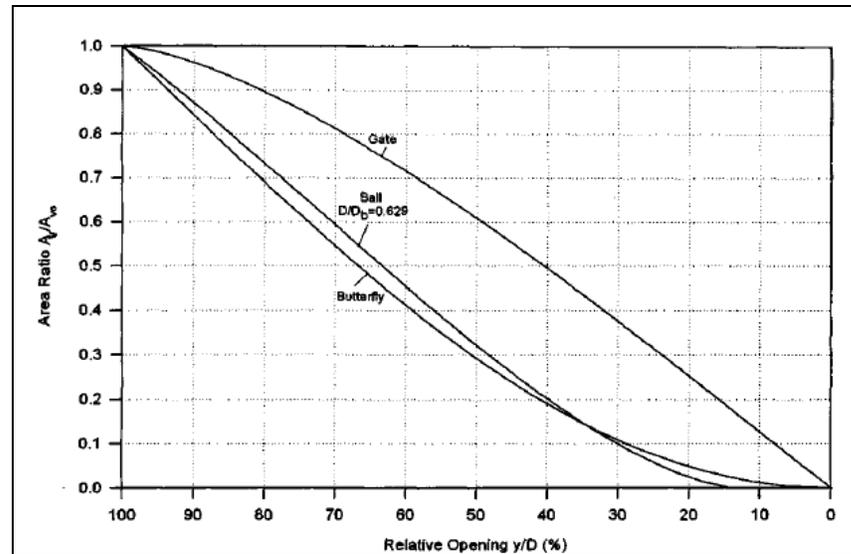
Cada tipo de válvula regula el caudal de diferente forma, ya que por su mecanismo de control, un elemento puramente geométrico, la variación del área respecto del grado de apertura es distinta para una válvula de compuerta que para una de mariposa y a su vez con las demás clases, como se muestra en la Figura 4.9.

Figura 4.8 Tipos de válvulas.



Fuente: Tullis, Hydraulics of pipelines, p.83

Figura 4.9 Variación de la relación de área para diferentes tipos de válvulas.



Fuente: Martin, Hydraulic Transient Design for Pipeline Systems, p. 12.8.

4.4.1 Esquemas de pérdidas.

La caída de presión a través de una válvula es proporcional al caudal. En este sentido, la pérdida de energía que ocurre en estos órganos de control es similar a la que presenta por cualquier otro elemento instalado en la tubería como Tees, codos, reducción, etc; sin embargo la ocasionada por una válvula no es constante, a diferencia de la demás pérdidas menores, puesto que varía en función de la apertura.

En ingeniería se han desarrollado diferentes formas de interpretar el gasto de energía en una válvula. Usualmente se refieren a factores, adimensionales o no, que relacionan la pérdida local con la velocidad de flujo o el caudal descargado. Entre los esquemas más comúnmente utilizados se encuentra el coeficiente de pérdida (Ecuación 4.21), el coeficiente de descarga (Ecuación 4.22) y el coeficiente de caudal (Ecuación 4.23).

$$K_l = \frac{2g\Delta H A^2}{Q^2} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

$$C_d = \frac{Q^2}{A^2(2g\Delta H)^{0.5}} \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Donde:

- ΔH Es la pérdida de energía a través de la válvula.
- Q Es el caudal descargado.
- V Es la velocidad del flujo en la conducción en estado permanente.
- g Es la aceleración de la gravedad
- A Es el área de la válvula completamente abierta.
- K_l Es el coeficiente de pérdida de la válvula.
- C_d Es el coeficiente de descarga de la válvula.

Los coeficientes de pérdidas y de descarga son factores adimensionales, mientras que el coeficiente de caudal solo está dado para unidades inglesas, puesto que representa el caudal, en galones por minuto, que puede descargar con una caída de presión de un 1 psi.

$$C_v = \frac{Q}{\left(\frac{\Delta P}{GS}\right)^{0.5}} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

Donde:

- ΔP Es la caída de presión a través de la válvula, en psi.
- Q Es la longitud de la conducción, en gpm.
- GS Densidad relativa del fluido.

Al mismo tiempo, existen expresiones que permiten encontrar la equivalencia entre los tres métodos de pérdidas, como se muestra en la Ecuación 4.24 y la Ecuación 4.25¹⁰

$$K = \frac{1}{C_d^2} - 1 \quad \text{Ecuación 4.24}$$

$$C_v = \left[\frac{890 D^4 C_d^{2.7}}{1 - C_d^2} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Donde:

- D Es el diámetro interno, en pulgadas.

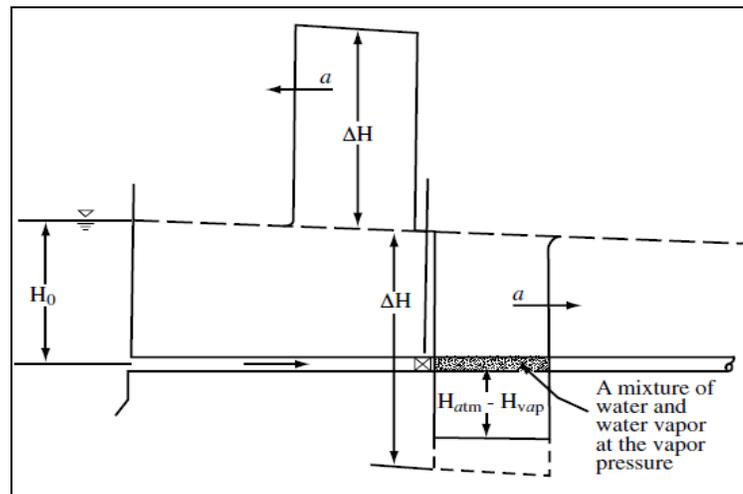
¹⁰ TULLIS, Paul. Hydraulic of Pipe Lines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients. United States of America: John Wiley & Sons, 1989. p. 91.

4.5 SEPARACIÓN DE COLUMNA

Los fenómenos transitorios en una tubería son asociados generalmente a altas presiones, sin embargo hay otra posible situación que se puede presentar asociada a la disminución de la presión local del fluido en la tubería y que también puede generar deformaciones en el ducto o hasta el colapso de las paredes de este.

Si la presión local del líquido cae hasta valores iguales o menores que la presión de vapor, entonces el líquido hierve (se produce cavitación, se vaporiza), formando grandes bolsillos con los gases no disueltos y el vapor (véase Figura 4.10). Este fenómeno se llama separación de la columna.

Figura 4.10 Separación de columna aguas abajo de una válvula, luego de un cierre súbito.



Fuente: LAROCK, et al, Hydraulic of Pipeline Systems, p. 392.

5 ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO

Para realizar el presente análisis de sensibilidad se siguió una serie de pasos, que permitieron encontrar los resultados que se muestran en el capítulo 10.

1. Inicialmente se definió del esquema a evaluar, teniendo en cuenta una serie de criterios que presentan en el numeral 6
2. Posteriormente se establecieron los lineamientos correspondientes al cálculo de los transitorios con el método de las características. Además se definieron los valores de las propiedades físicas del agua y de la tubería a usar, tipo de tubería, supuestos generales de cálculo y condiciones de frontera usadas.
3. Se desarrolló una hoja de cálculo que estimara la altura piezométrica y el caudal, en condiciones no permanentes, usando el método de las características expuesto en el numeral 4.2.2.
4. Se elaboró un modelo en el programa AFT Impulse® (Versión de prueba), que simulara el esquema del sistema distribución planteado en el paso 1.
5. Se realizó la simulación de un cierre y una apertura simultanea de la válvulas en aproximadamente 20 s, usando la hoja de cálculo y el software AFT Impulse®, con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos por los dos medios.
6. Una vez se calibraron los modelos y se redujeron los errores de estimación del caudal y la altura piezométrica, se procedió a realizar la evaluación del sistema propuesto, para las maniobras indicadas en el capítulo 2.
7. Finalmente, se efectuó el análisis de los resultados obtenidos que permitieron establecer las conclusiones del presente documento.

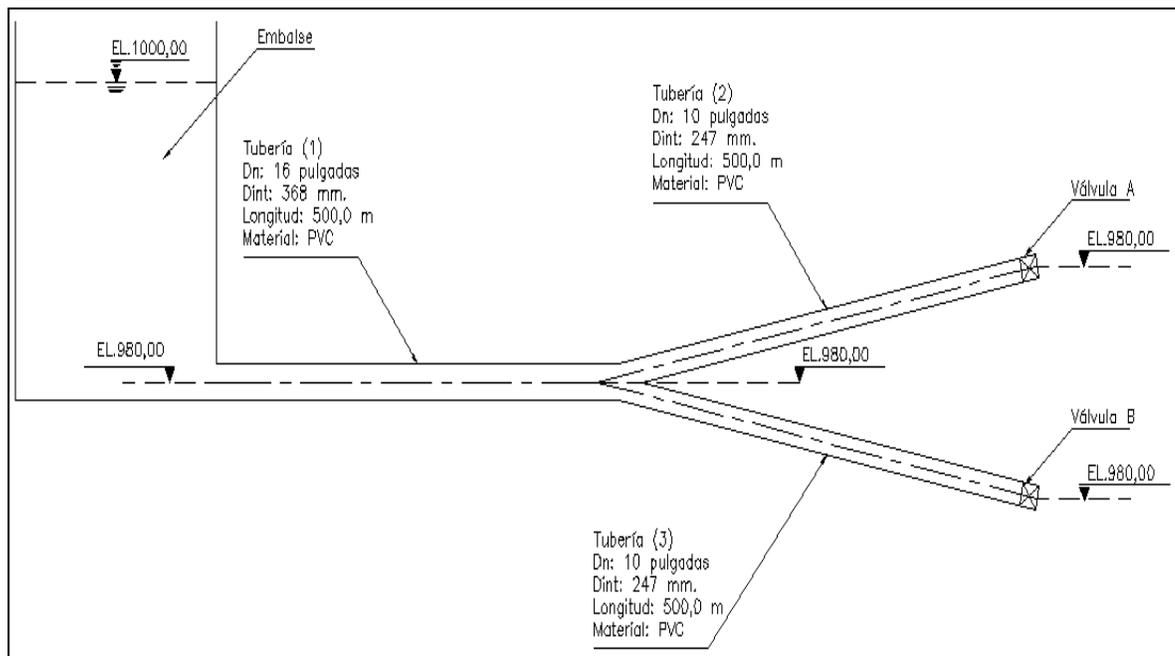
6 TOPOLOGÍA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN A ANALIZAR

Para el planteamiento del sistema a evaluar se consideraron los siguientes criterios:

- Para obviar la topografía, se planteó un sistema de conducción horizontal.
- El sistema fue dimensionado (diámetros de tuberías, cota de embalse y cotas de las tuberías) de tal forma que la velocidad media de flujo en las tuberías, en condiciones permanentes, fueran cercanas a una velocidad de diseño.
- Las longitudes para la tubería principal (No 1) y las tuberías aguas abajo de la bifurcación (No 2 y 3) se seleccionaron iguales y con un valor de 500,0 m, para facilitar que el valor de Δt usado en el cálculo no fuera muy pequeño ($\Delta t > 0,5$ s).

En la Figura 6.1 se muestra el esquema de distribución que analiza en el presente documento.

Figura 6.1 Esquema del sistema de distribución analizado.



7 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE UN TRANSITORIO.

Para encontrar las condiciones de flujo (Caudal y altura piezométrica) en cada instante de la operación de la válvula se utilizó el método numérico de las características, expuesto en el numeral 4.2.2

En este análisis se realizaron los siguientes supuestos:

- El factor de fricción en las tres tuberías es constante en cualquier periodo de tiempo, aun cuando el caudal se modifique por la acción de la apertura de válvula. Ya que, luego de realizar verificaciones con la ayuda del programa AFT Impulse®, que permite realizar simulaciones con el factor de fricción variable, se encontraron resultados muy parecidos: el valor pico de la altura piezométrica solo varia 1,0 m. Teniendo en cuenta lo anterior, no se justifica realizar el gasto computacional para que la hoja de cálculo permita realizar los cálculos con este parámetro variable.
- Solo se consideraron las pérdidas locales ocasionadas por las válvulas, es decir se despreciaron la pérdida por entrada en la tubería y por la bifurcación. Lo anterior, debido a que en el esquema planteado la disminución de la energía se debe principalmente a la fricción, por lo cual no se cometen errores significativos al despreciar las demás perturbaciones locales.
- La variación de la apertura de las válvulas en las diferentes maniobras a realizar es lineal. Esto no significa que la variación del área efectiva sea lineal, teniendo en cuenta que se utilizan 2 válvulas diferentes.
- La temperatura de agua es de 20°C, por lo tanto las propiedades físicas del agua utilizadas en el cálculo de los transitorios son las mostradas en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Propiedades físicas del agua a 1 Atm y 20°C.

Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática	Densidad	Peso específico	Módulo de elasticidad volumétrica	Presión de vapor
μ	ν	ρ	γ	K	
Kg/m_s	m ² /s	Kg/m ³	KN/m ³	KN/m ²	mca
0,001003	1,005E-06	998,29	9.789	2,17E+06	0,238

Fuente: Streeter y Wylie, Mecánica de los fluidos, p. 567.

- El material de las tuberías es PVC. Para los diámetros internos, los espesores de las paredes del ducto y la propiedades físicas del material, se adoptó la información consignada en el manual técnico de tuberías PAVCO (véase Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Propiedades físicas de las tuberías PVC.

Característica	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 3	Unidad
Módulo de elasticidad de la tubería	E	2758000	2758000	2758000	KN/m ²
Diámetro nominal	Dn	16	10	10	Pulgadas
Diámetro interno de la tubería	D	368	247	247	mm
Espesor de la tubería	e	19	13	13	mm
Rugosidad absoluta	Ks	0,0015	0,0015	0,0015	mm
Relación diámetro espesor	RDE	21	21	21	-
Presión de trabajo		1,38	1,38	1,38	Mpa

Fuente: PAVCO SA, Manual técnico, Tubosistemas para Acueducto: Unión platino y alta presión

- Se adoptaron las condiciones de frontera indicadas en el numeral 7.1.

7.1 CONDICIONES DE FRONTERA.

Para la solución del esquema planteado se requieren de tres condiciones de frontera: Nivel en el embalse, altura piezométrica en el punto de la bifurcación y la curva de funcionamiento de la válvula.

7.1.1 Nivel en el embalse.

Para el presente estudio se supuso que el nivel en el embalse sería constante, considerando que las oscilaciones que presentan en el reservorio no representan cambios significativos en la solución y, por el contrario, si exige un cálculo adicional.

En el presente estudio, cada tiempo evaluado, la superficie del agua en el reservorio se encuentra en la cota 1000,0 msnm.

7.1.2 Altura piezométrica en la bifurcación.

Tal como se mencionó anteriormente, las pérdidas ocasionadas por la bifurcación se despreciaron. Esto implica que la altura piezométrica, al igual que presión, tiene

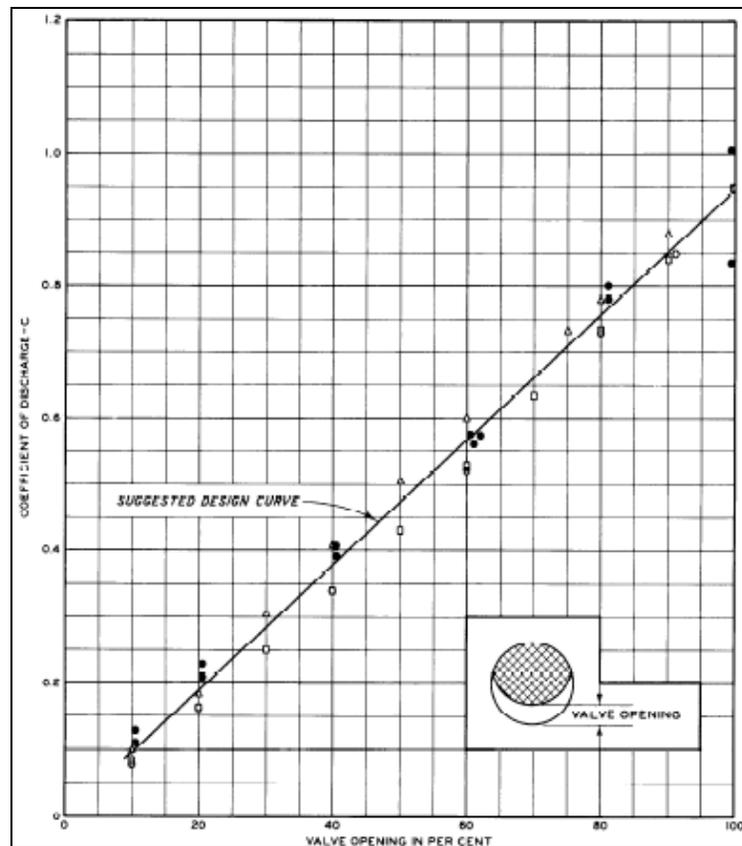
en el mismo valor en el punto final de la tubería principal (No 1) y los puntos iniciales de las tuberías ubicadas aguas abajo de la bifurcación (No 2 y 3).

Además, al considerar que la presión es igual en los tres puntos que componen la bifurcación, se puede encontrar el valor del caudal y de la altura piezométrica, en cada instante de tiempo, con la ayuda de la Ecuación 4.15 a Ecuación 4.18.

7.1.3 Curvas características de las válvulas.

El caudal que fluye por el sistema está definido por el coeficiente de descarga que caracteriza la válvula que realiza el control. Para el presente estudio se adoptaron las curvas de descarga recomendadas por el United State Army Corps Engineers (USACE), para válvulas de compuerta (véase Figura 7.1) y válvulas de mariposa (véase Figura 7.2) con descarga libre¹¹.

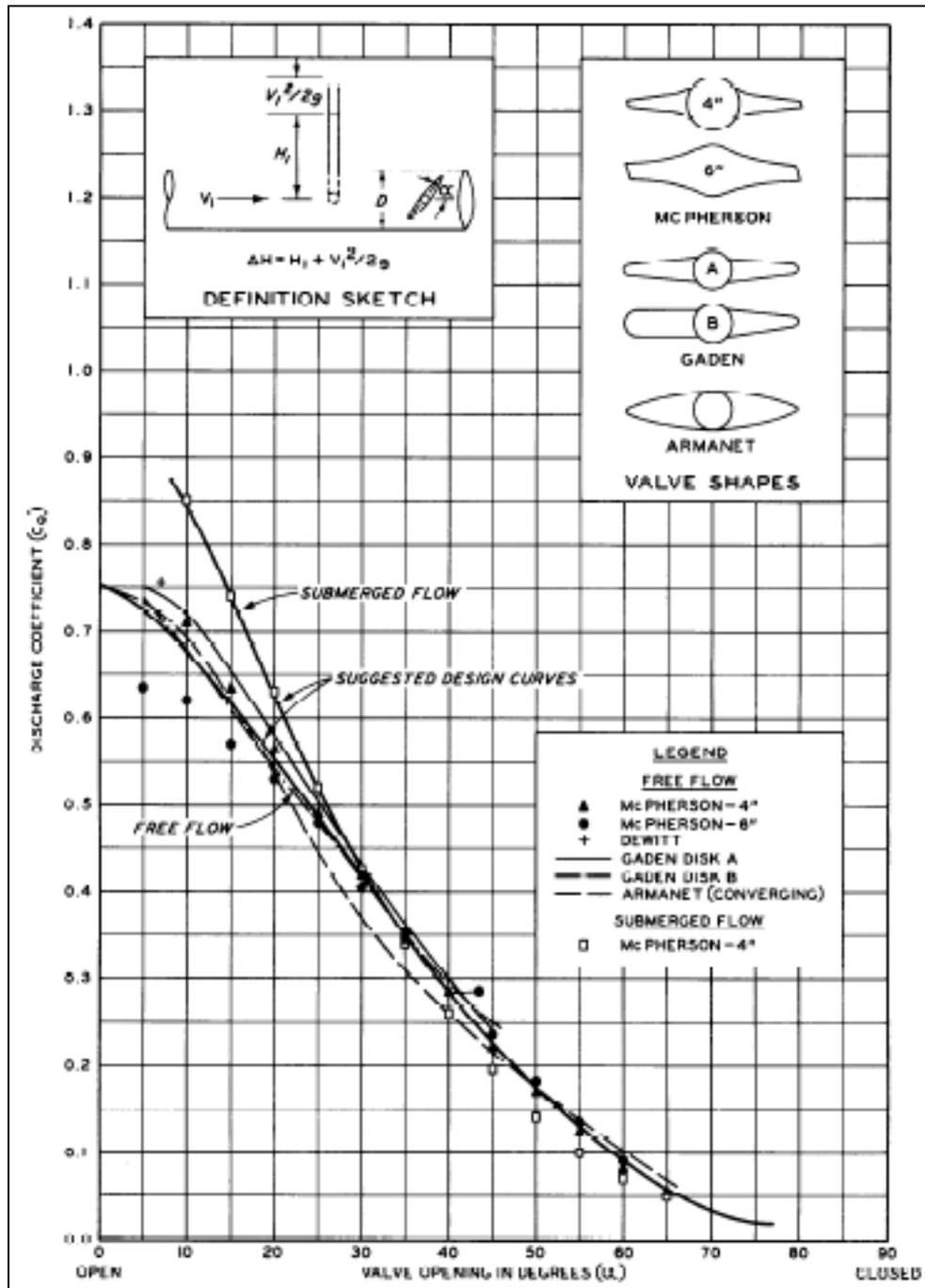
Figura 7.1 Curva de descarga para una válvula de compuerta con descarga libre.



Fuente: USACE, HYDRAULIC DESIGN CHART 330-1/1

¹¹ United State Army Corps Engineers. Hydraulic Design Criteria, Sheets 330-1 and 330-1/1, Sheetts 331-1 to 331-3.

Figura 7.2 Curva de descarga para una válvula de mariposa próxima a una descarga libre.



Fuente: USACE, HYDRAULIC DESIGN CHART 331-1/1

7.2 NUMERO DE SEGMENTOS EN LAS TUBERÍAS.

Es conveniente, inicialmente, para el desarrollo del proceso numérico, definir el número de tramos. Para definir el número de segmentos a usar se fijaron tres puntos de medición en cada tubería, por lo cual solo se requieren dos segmentos por tramo.

Definido el número segmentos por tubería y teniendo en cuenta que la longitud de las tuberías es de 500,0 m (véase Figura 6.1), se fija la longitud de estos (ΔX) en 250,0 m.

7.3 INTERVALO DE TIEMPO DE CÁLCULO (ΔT)

Como la Ecuación 4.4 solo se satisface si $\lambda = \pm 1/\rho c$, es decir:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \pm a$$

Teniendo en cuenta que el Δt puede ser diferente en cada tramo del sistema modelado, se seleccionó un intervalo de cálculo que permitiera cumplir con esta restricción. Para aquel tramo que no sea posible cumplir con exactitud esta condición, se buscó cumplir con la condición de estabilidad de Courant (véase Ecuación 7.1) para que este último valor esté lo más próximo posible a 1.

$$\frac{\Delta t a}{\Delta x} \leq 1$$

Ecuación 7.1

Establecidas estas condiciones se procedió a utilizar la hoja de cálculo desarrollada. Adicionalmente, como se muestra en el capítulo 8, los datos obtenidos se confirmaron con la ayuda del programa AFT Impulse®.

8 HERRAMIENTAS DE CÁLCULO DEL TRANSITORIO

En este capítulo se presentan las herramientas de cálculo utilizadas para el cálculo del transitorio: hoja de cálculo propia y AFT Impulse®. Estas ayudas de cálculo utilizan el método numérico de las características explicado en numeral 4.2.2.

8.1 HOJA DE CÁLCULO

Esta herramienta fue desarrollada por el autor del documento y fue planteada como un objetivo del trabajo de grado. Esta hoja de cálculo permite estimar el comportamiento de un sistema de distribución con una bifurcación y válvulas en los extremos, ante la eventualidad de flujo transitorio. Para esto es necesario conocer las condiciones de flujo en régimen permanente, las características de las tuberías y las características del fluido, en este caso del agua. Esta información se debe consignar en la hoja denominada como datos de entrada (véase Figura 8.1). Solo se deben diligenciar los espacios con letra de color rojo, los demás valores son calculados a partir de estos. Las propiedades físicas del agua podrán ser cargadas con solo digitar la temperatura del agua.

Se debe tener especial cuidado con la selección del intervalo de cálculo, con el fin de garantizar la estabilidad de la solución. Por esta razón, se recomienda escoger un Δt que permita cumplir con la condición de Courant (Ecuación 7.1).

Las siguientes hojas del libro de cálculo estiman las condiciones del transitorio. Solo se debe modificar el espacio denominado tiempo de cierre (letra en color rojo) y se podrá obtener los valores máximos y mínimos de la altura piezométrica, en los puntos de observación definidos (véase Figura 8.2). En el caso de requerir mayor tiempo de simulación solo se debe arrastrar la última hasta que se tenga el número de instantes solicitados.

Figura 8.1 Página de datos de entrada de la hoja de cálculo.

DATOS DE ENTRADA					
DATOS DE LAS TUBERIAS					
Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 3	Unidad
Longitud de la tubería	L1	500	500	500	m
Diámetro interno de la tubería	D	388	247	247	mm
Espesor de la tubería	e	19	13	13	mm
Rugosidad absoluta	Ks	0.0015	0.0015	0.0015	mm
Cota inicial del eje	Zi	980	980	980	msnm
Cota final del eje	Zf	980	980	980	msnm
Caudal en flujo permanente	Q	309.08	154.53	154.53	L/s

DATOS DEL SISTEMA			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura del agua	T	20	°C
Nivel inicial del tanque	Hres	1000	msnm
Viscosidad cinemática	v	1.005E-06	m ² /s
Módulo de elasticidad volumétrica	K	2.17E+06	KN/m ²
Densidad del agua	ρ	998.29	Kg/m ³
Módulo de elasticidad de la tubería	E	2758000	KN/m ²

*Diligenciar unicamente los espacios con texto rojo

CALCULOS INICIALES					
Descripción	Símbolo	T. Principal	T. Bif. 1	T. Bif. 2	Unidad
Rugosidad relativa	s/D	4.07809E-06	6.07287E-06	6.07287E-06	-
Área interna de la tubería	A	0.1064	0.0479	0.0479	m ²
Velocidad en flujo permanente	V	2.9057	3.2250	3.2250	m/s
Numero de Reynolds	Re	1064292.221	792833.0717	792833.0717	-
Factor de fricción	f	0.0116	0.0122	0.0122	-
Velocidad de una onda sonora en la tubería	a	365.86	369.17	369.17	m/s
Numero de segmentos	n	2	2	2	-
Variación de longitud en el eje x	ΔX	250	250	250	m
Variación del tiempo ideal	Δti	0.683312954	0.677186793	0.677186793	s
Variación del tiempo usado	ΔT	0.677	0.677	0.677	s
Número de Courant		0.99	1.00	1.00	-
Contantes de cálculo	B	350.64	785.38	785.38	-
Contantes de cálculo	R	35.53	274.80	274.80	-

Tiempo de Fase de cada tubería	T _{tubería}	2.73	2.71	2.71
Tiempo de Fase del sistema	T _{sistema}	5.44		

RDE 21 PVC Tipo 1, Grado 1							
Presión de trabajo a 23°C: 200 psi - 1.38 MPa - 14.06 Kg/cm ²							
Diámetro Nominal	Ref.	Peso Aprox.	Diámetro Exterior Prom.		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Prom.
pulg.		Kg/m	mm	pulg.	mm	pulg.	mm
2	2900010	0.81	60.32	2.375	2.87	0.113	54.58
2.1/2	2900018	1.18	73.03	2.875	3.48	0.137	66.07
3	2900022	1.76	88.90	3.500	4.24	0.167	80.42
4	2900033	2.90	114.30	4.500	5.44	0.214	103.42
6	2900043	6.31	168.28	6.625	8.03	0.316	152.22
8	2900054	10.67	219.03	8.623	10.41	0.409	198.21
10	2902411	16.63	273.05	10.750	12.98	0.511	247.09
12	2902421	23.45	323.85	12.750	15.39	0.605	293.07
14	2902431	28.14	355.60	14	16.92	0.666	321.76
16	2902435	36.78	406.40	16	19.35	0.762	367.70
18	2902439	46.53	457.20	18	21.77	0.857	413.66
20	2902443	53.82	508.00	20	24.18	0.952	459.64
24	NUEVO	80.62	609.6	24	29.03	1.143	551.54

*Fuente PAVCO (Tubería union platino)

Figura 8.2 Resultados del transitorio.

Tubería 2		Tubería 3		$t_{\text{trans}} = 20$ T			Tramo	Tubería 1 (Principal)			Tubería 2 (aguas abajo bifurcación)			Tubería 3 (aguas abajo bifurcación)					
785.38		785.38		$t_{\text{trans}} = 108.8400$ s			Abscisa	K0+000.00	K0+250.00	K0+500.00	K0+500.00	K0+750.00	K1+000.00	K0+500.00	K0+750.00	K1+000.00			
274.80		274.80		$\Delta_{\text{aperturas}} = 0.62$ %			Inicial (msnm)												
				$\Delta_{\text{aperturas}} = 0.62$ %			Máxima (msnm)												
							Mínima (msnm)												
								TUBERÍA 1 (PRINCIPAL)			NODO			TUBERÍA 2 (AGUAS ABAJO DE LA BIFURCACIÓN)					
Malla de caudales (m³/s)				Malla alturas piezométricas (m)				Altura piezométrica (m)			Malla de caudales (m³/s)			Malla de alturas piezométricas (m)					
Puntos de observación			Puntos de observación			H _{...} (m)			Puntos de observación			Puntos de observación							
1	2	3	1	2	3		3	4-2	5-2	3	4-2	5-2							
K0+000.00	K0+250.00	K0+500.00	K0+000.00	K0+250.00	K0+500.00		K0+500.00	K0+750.00	K1+000.00	K0+500.00	K0+750.00	K1+000.00							
0.3091	0.3091	0.3091	1000	996.6062	993.2123	993.2123	0.1545	0.1545	0.1539	993.2123	986.6502	980.5828							
0.3091	0.3091	0.3091	1000	996.6062	993.2123	993.2123	0.1545	0.1540	0.1539	993.2123	987.1196	980.5905							
0.3091	0.3091	0.3079	1000	996.6062	993.6277	993.6277	0.1540	0.1540	0.1540	993.6277	987.1269	980.5987							
0.3091	0.3079	0.3079	1000	997.0089	993.6341	993.6341	0.1539	0.1540	0.1540	993.6341	987.1074	980.6067							
0.3069	0.3079	0.3080	1000	997.0151	993.6347	993.6347	0.1540	0.1540	0.1539	993.6347	987.1145	980.6147							
0.3069	0.3069	0.3079	1000	996.6373	993.6412	993.6412	0.1540	0.1540	0.1539	993.6412	987.1401	980.6229							
0.3070	0.3069	0.3070	1000	996.6379	993.2733	993.2733	0.1535	0.1539	0.1539	993.2733	987.1478	980.6316							
0.3070	0.3070	0.3070	1000	996.6360	993.2743	993.2743	0.1535	0.1535	0.1539	993.2743	986.7839	980.6402							
0.3071	0.3070	0.3071	1000	996.6365	993.2748	993.2748	0.1535	0.1535	0.1531	993.2748	986.7862	980.6421							
0.3070	0.3071	0.3070	1000	996.6387	993.2759	993.2759	0.1535	0.1531	0.1531	993.2759	987.1153	980.6509							
0.3071	0.3071	0.3063	1000	996.6393	993.5706	993.5706	0.1532	0.1531	0.1532	993.5706	987.1226	980.6607							
0.3071	0.3064	0.3063	1000	996.9230	993.5762	993.5762	0.1531	0.1532	0.1531	993.5762	987.1160	980.6698							
0.3057	0.3063	0.3064	1000	996.9279	993.5823	993.5823	0.1532	0.1531	0.1532	993.5823	987.1234	980.6796							
0.3056	0.3057	0.3063	1000	996.6672	993.5882	993.5882	0.1532	0.1532	0.1531	993.5882	987.1444	980.6891							
0.3057	0.3056	0.3057	1000	996.6683	993.3329	993.3329	0.1529	0.1532	0.1532	993.3329	987.1524	980.6995							
0.3057	0.3058	0.3057	1000	996.6657	993.3350	993.3350	0.1528	0.1529	0.1532	993.3350	986.3010	980.7095							
0.3058	0.3057	0.3058	1000	996.6667	993.3358	993.3358	0.1529	0.1529	0.1526	993.3358	986.3053	980.7146							
0.3057	0.3058	0.3057	1000	996.6700	993.3380	993.3380	0.1529	0.1526	0.1526	993.3380	987.1368	980.7249							
0.3058	0.3058	0.3053	1000	996.6711	993.5472	993.5472	0.1526	0.1526	0.1526	993.5472	987.1448	980.7363							
0.3058	0.3053	0.3052	1000	996.8710	993.5526	993.5526	0.1526	0.1526	0.1526	993.5526	987.1461	980.7470							
0.3048	0.3052	0.3053	1000	996.8751	993.5612	993.5612	0.1526	0.1526	0.1526	993.5612	987.1543	980.7586							
0.3047	0.3048	0.3052	1000	996.6957	993.5669	993.5669	0.1526	0.1526	0.1526	993.5669	987.1723	980.7698							
0.3048	0.3047	0.3048	1000	996.6973	993.3904	993.3904	0.1524	0.1526	0.1526	993.3904	987.1810	980.7820							
0.3047	0.3048	0.3047	1000	996.6948	993.3936	993.3936	0.1524	0.1524	0.1526	993.3936	987.0088	980.7937							
0.3048	0.3048	0.3048	1000	996.6964	993.3950	993.3950	0.1524	0.1524	0.1522	993.3950	987.0152	980.8020							
0.3048	0.3048	0.3048	1000	996.7001	993.3983	993.3983	0.1524	0.1522	0.1522	993.3983	987.1791	980.8120							

8.2 AFT IMPULSE®

Esta herramienta fue desarrollada Applied Flow Technology Corp. Este programa tiene una interfaz de trabajo mucho más amigable y permite simular cualquier sistema de tubería.

En la Figura 8.3 se presenta el espacio de trabajo de programa. Construir un modelo es realmente fácil, tan solo se debe arrastrar los elementos del lado izquierdo de la pantalla e interconectarlos usando el icono de la tuberías. Además hay que cumplir con 5 pasos: definir las propiedades del sistema lo que implica establecer el tipo de fluido y las características de las físicas del mismo, definir las propiedades de las tuberías y demás elementos que componen el sistema (véase como ejemplo la Figura 8.4), posteriormente es necesario indicar al programa el número de segmentos a utilizar para que el defina el Δt más adecuado (véase Figura 8.5). Finalmente se escoge el tiempo de duración de la simulación y los esquemas adicionales de solución, como fricción variable y solución con cavitación.

Figura 8.3 Espacio de trabajo en AFT Impulse®.

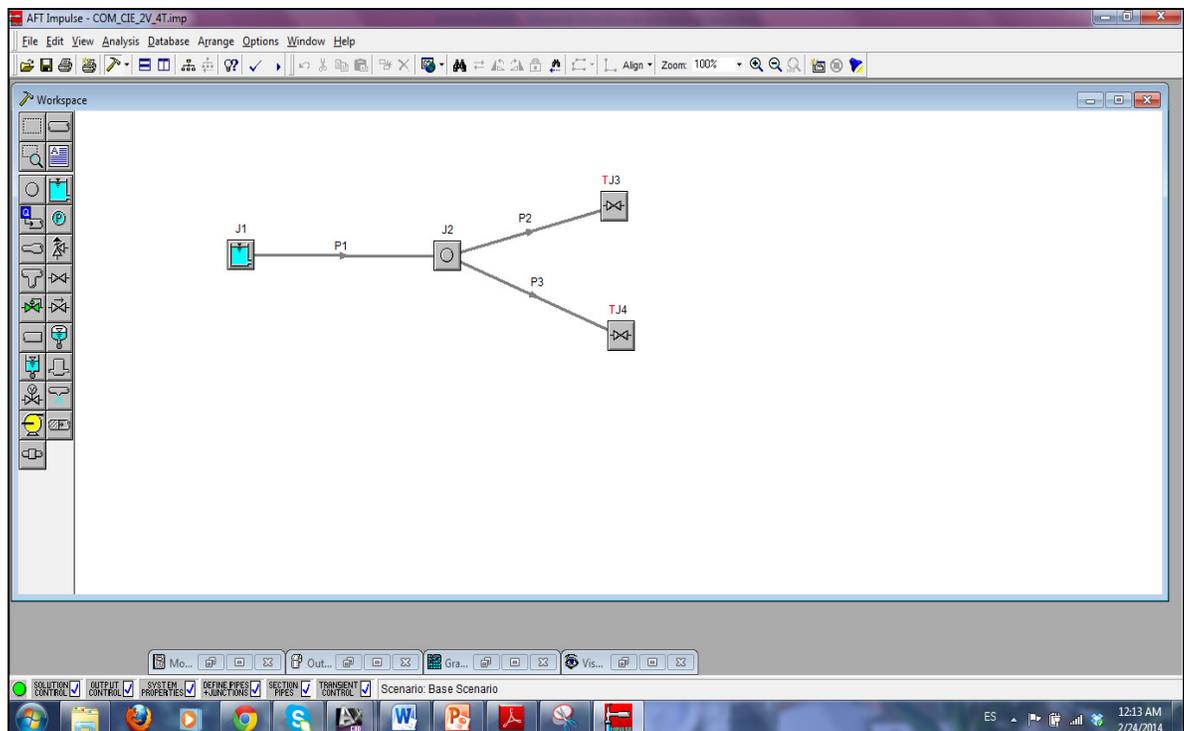


Figura 8.4 Definición de las características de la válvula

Valve Specifications

Number: 3
 Name: Valve
 Database List:
 Same as Jgt...
 Upstream Pipe: 2
 Downstream Pipe: None
 Elevation: 980 meters
 Inlet: 980 meters
 Outlet: Same as Inlet
 Loss Model | Transient Data | Optional | Notes | Status
 Valve Data Source
 Handbook Data
 User Specified
 Loss Model
 Cv (Constant)
 K Factor (Constant)
 Basis Area for Loss Model
 Default - Upstream Pipe
 Cv: 8583.07
 Base Area from Pipe 2:
 0.04792 meters² (D = 247.0 mm)
 Exit Valve (optional)
 H_gad (HGL) Pressure
 Exit Pressure: 980 meters

Figura 8.5 Definición del Δx y el Δt .

Section Pipes

Search for Sectioning Options
 Min. Sections in Controlling Pipe: 2
 Max. Sections in Controlling Pipe: 2
 Max. Percentage Error: 10
 Percentage Increment: 5
 Search
 Sort Sectioning by Minimum Error
 Search Results:

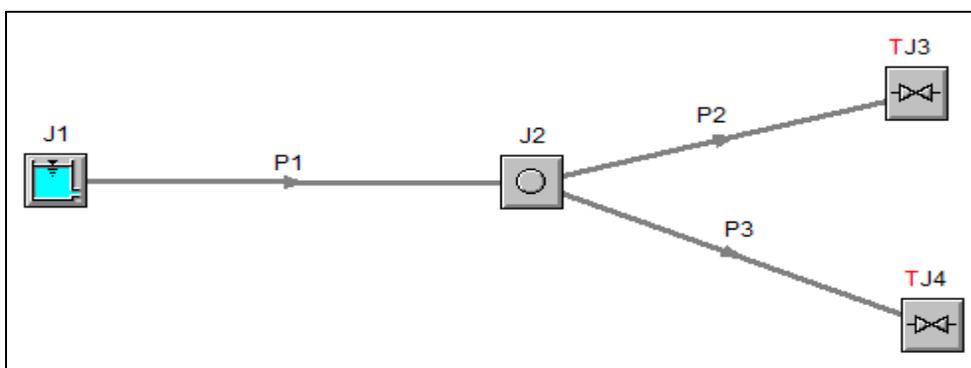
Pipe	Length (meters)	Wavespeed (meters/sec)	Ideal # of Sections	Integer # of Sections	Error (Percent)	Modified Wave Speed (meters/sec)	B (meters/sec per meters ²)
1	500.0	365.9	2.018	2.000	-0.897	369.2	0.006466
2	500.0	369.2	2.000	2.000	0.000	369.2	0.014353
3	500.0	369.2	2.000	2.000	0.000	369.2	0.014353

 Copy
 Combine Pipes
 Combining Pipes Can Dramatically Reduce the Model Run Time!
 Number of Pipes That Could Be Combined = 0
 Combine Pipes...
 Controlling Pipe: 2
 Ideal Number of Sections in Controlling Pipe: 2
 Time Step (sec): 0.677195
 Update Sectioning Table
 Note: The units used above are the preferred units for length, velocity and area specified in the Parameters and Unit Preferences

9 JUSTIFICACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos a partir del método de las características, mediante la hoja de cálculo elaborada en el presente trabajo, se modeló el sistema propuesto en una versión de prueba del programa AFT Impulse®. Este programa utiliza el mismo método numérico para encontrar las características de flujo en cualquier instante de tiempo. En la Figura 9.1 se muestra el esquema del modelo definido para los estudios de sensibilidad utilizado en el software de comparación.

Figura 9.1 Esquema y principales resultados del modelo en AFT Impulse®.



9.1 CIERRE SIMULTÁNEO

Inicialmente se ensayó una maniobra de cierre simultáneo en las dos válvulas, con una duración de 20,0 s. Los datos introducidos al software son los mismos que se indicaron para la hoja de cálculo en el numeral 7. La única diferencia radica en que este resuelve la condición de frontera en las válvulas con el esquema de pérdidas del coeficiente de caudal, por lo cual fue necesario utilizar la Ecuación 4.25 para realizar la conversión de Coeficiente de descarga (C_d) a Coeficiente de caudal (C_v) (véase Tabla 9.1).

Tabla 9.1 Coeficiente de caudal utilizados en la simulación de verificación, en el programa AFT Impulse®.

t (s)	Apertura (%)	C_d	C_v	t (s)	Apertura (%)	C_d	C_v
0	100,00			0,95	8583,07		
0,677	96,62	0,92	6447,95	11,509	42,46	0,40	1247,97

t (s)	Apertura (%)	C _d	C _v	t (s)	Apertura (%)	C _d	C _v
1,354	93,23			0,88	5288,17		
2,031	89,85	0,85	4522,37	12,863	35,69	0,35	1038,59
2,708	86,46	0,81	3962,06	13,54	32,30	0,31	929,73
3,385	83,08	0,78	3570,07	14,217	28,92	0,28	820,12
4,062	79,69	0,76	3267,34	14,894	25,53	0,25	713,83
4,739	76,31	0,72	2952,84	15,571	22,15	0,21	610,33
5,416	72,92	0,69	2683,40	16,248	18,76	0,18	516,47
6,093	69,54	0,66	2447,71	16,925	15,38	0,15	436,77
6,77	66,15	0,62	2238,06	17,602	11,99	0,12	340,71
7,447	62,77	0,59	2072,89	18,279	8,61	0,09	243,66
8,124	59,38	0,56	1925,81	18,956	5,22	0,05	147,46
8,801	56,00	0,53	1762,97	19,633	1,84	0,02	51,78
9,478	52,61	0,50	1611,90	20,31	0,00	0,00	0,00
10,155	49,23	0,46	1476,89				

Los resultados obtenidos, utilizando las dos herramientas, se compararon con el fin de verificar la veracidad de los mismos. Se encontró que el caudal que es descargado en cada ramal, calculado con la hoja de cálculo que usa el método de las características y el software de comparación es prácticamente el mismo, como se muestra en la Figura 9.2.

De igual forma se examinó la estimación de la altura piezométrica en la descarga. Se aprecia (véase Figura 9.3) que los resultados obtenidos por las dos metodologías son muy similares

Figura 9.2 Variación del caudal obtenida por las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre simultaneo.

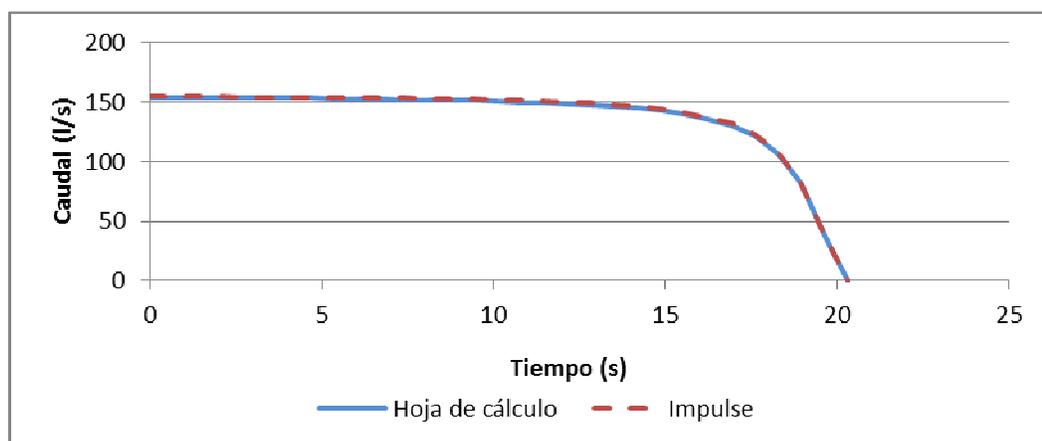
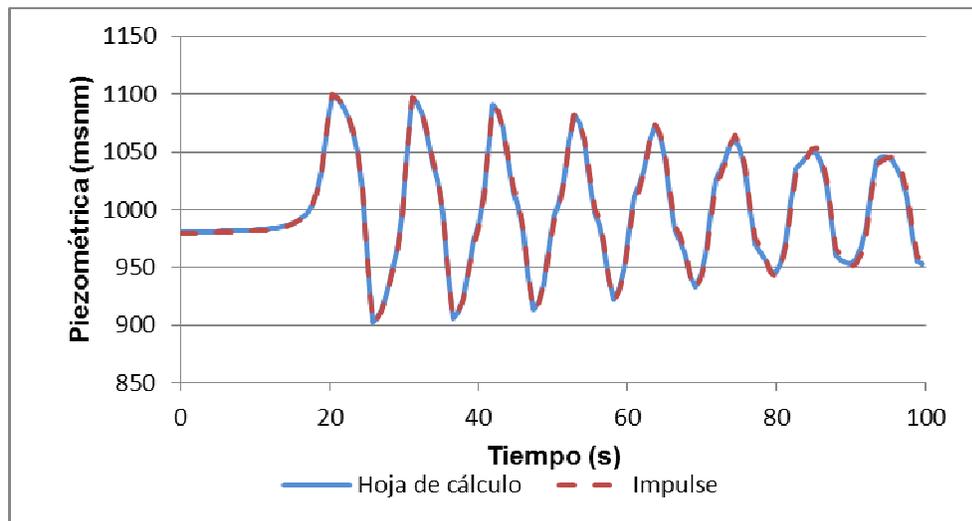
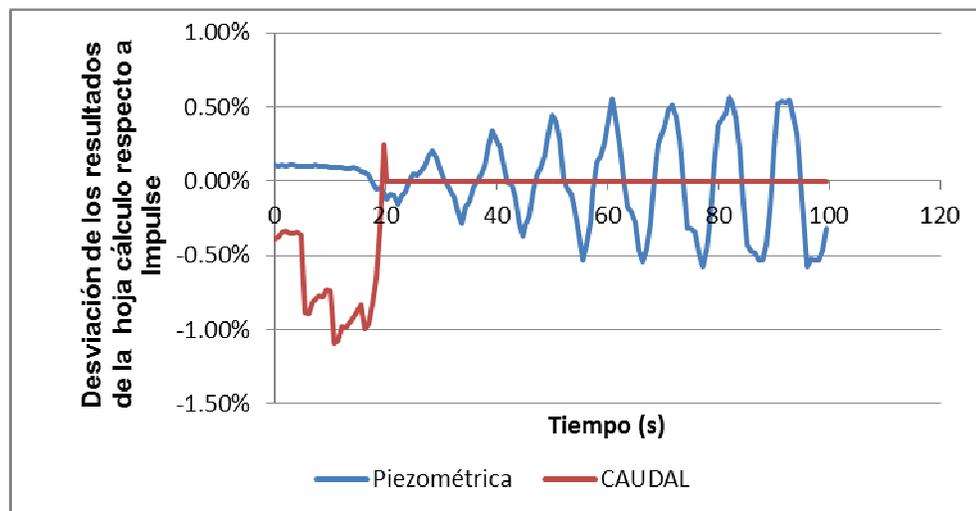


Figura 9.3 Variación de la altura piezométrica en la descarga usando las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre simultaneo.



Finalmente, se estimó la desviación de los caudales y alturas piezométricas, estimadas con la ayuda de la hoja de cálculo respecto de los resultados de AFT Impulse®, durante todo el proceso de la simulación. En esta revisión se halló que la desviación máxima de los resultados de los caudales para cualquier instante de tiempo es aproximadamente 1%, mientras que para la alturas piezométricas es de 0,60% (véase Figura 9.4).

Figura 9.4 Desviación de los resultados de la hoja cálculo respecto a AFT Impulse®, para una maniobra de cierre simultaneo.



9.2 CIERRE DESFASADO

De igual forma se realizó una comparación de los resultados para una maniobra de cierre desfasada, con una duración de 20,0 s, encontrando que los resultados son prácticamente los mismos usando la hoja de cálculo o AFT Impluse®, al igual que los obtenidos para operación simultánea, como se muestra en la Figura 9.5, Figura 9.6 y Figura 9.7.

Con base en la información mostrada en el presente numeral, se puede concluir que los resultados encontrados por la hoja de cálculo son adecuados, ya que la desviación respecto de los datos obtenidos del AFT Impulse® es mínima.

Figura 9.5 Variación del caudal obtenida por las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre desfasada.

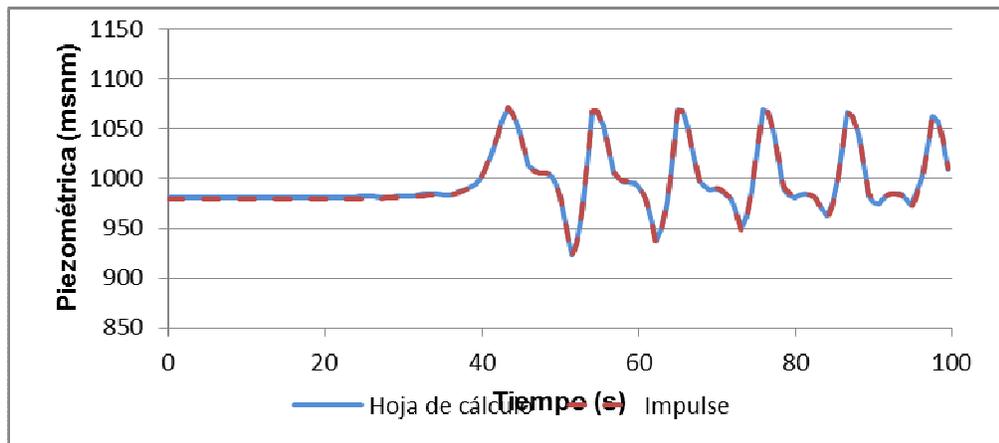


Figura 9.6 Variación de la altura piezométrica en la descarga usando las dos herramientas de cálculo, para una maniobra de cierre desfasada.

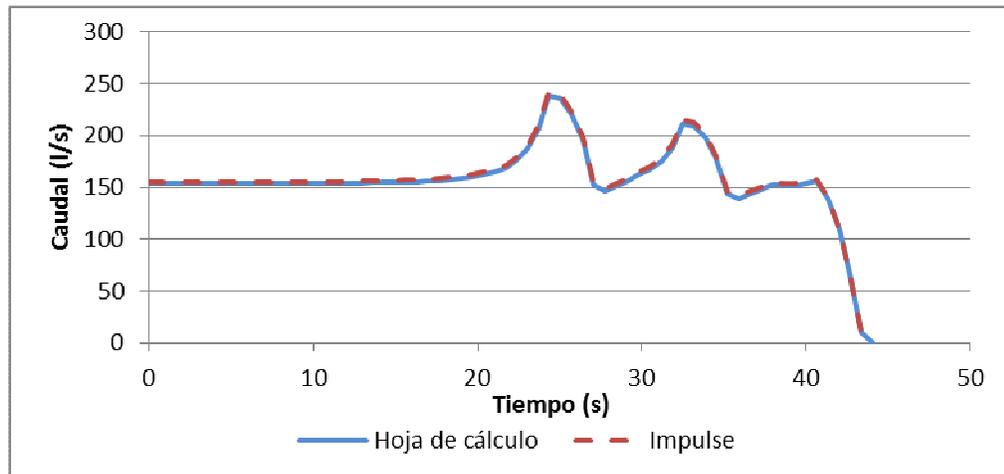
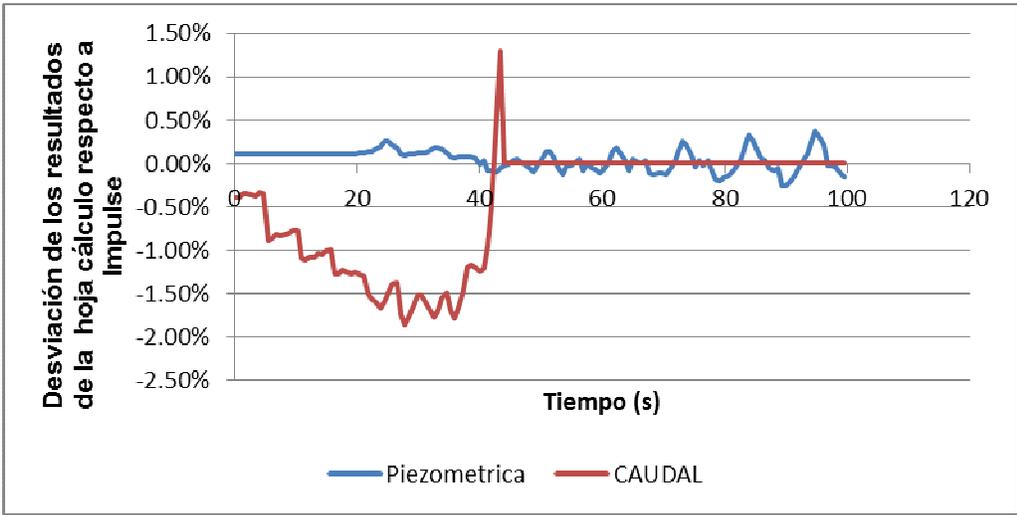


Figura 9.7 Desviación de los resultados de la hoja cálculo respecto a AFT Impulse®, para una maniobra de cierre simultaneo.



10 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

Verificadas la calidad de las herramientas numéricas de cálculo (un objetivo del presente trabajo era construir un modelo propio) se procedió al estudio de sensibilidad del modelo topológico establecido en el numeral 6, con el fin de proponer recomendaciones prácticas para las operaciones de cierre, cuando en un sistema de tuberías se disponga de este modelo topológico.

Para el estudio de sensibilidad se establecieron las siguientes condiciones:

- Utilización de válvulas de compuerta y mariposa, como órganos de control.
- Simultaneidad e igual tiempo de cierre de los órganos de control.
- Desfase en la operación con igual tiempo de cierre de los órganos de control.

10.1 CIERRE SIMULTÁNEO CON VÁLVULA DE COMPUERTA

La maniobra evaluada, en el presente subcapítulo, corresponde al evento en el cual los dos ramales se encuentran trabajando con sus válvulas de compuerta completamente abiertas y seguidamente estas se cierran completamente, en el mismo tiempo t .

10.1.1 Cálculos preliminares.

Para realizar la simulación del fenómeno de transitorio descrito anteriormente se requiere conocer las condiciones de flujo en régimen permanente ya que estas corresponde a la solución en el instante 0 y es a partir de estas que se puede obtener la variación del caudal y de la altura piezométrica, definir un Δt adecuado que permita conseguir una solución estable (véase numeral 7.3) y conocer las constantes (B, R) que el método usa para estimar las pendiente C^+ y C^- (características) de la malla de solución.

- **Solución en flujo permanente.**

Para encontrar las características de flujo en condición permanente se utilizó el programa EPANET 2.0®, desarrollado por el United States Environmental Protection Agency (EPA). En la Figura 10.1 se muestra el esquema general del modelo en el programa seleccionado y la solución estima por este.

Los diámetros, cotas y longitudes de la tubería usados, corresponde a las mostrados en la Figura 6.1. Las características físicas del agua y de las tuberías son las mismas que usaron para el cálculo en régimen no permanente (véase numeral 7).

En el caso del esquema de pérdidas, EPANET 2.0® utiliza el coeficiente de pérdidas para resolver pérdida de carga en la válvula. Por esta razón es necesario realizar la conversión del valor de Cd cuando la apertura es del 100% (véase Tabla 10.1), con la ayuda de la Ecuación 4.24.

Figura 10.1 Esquema del modelo en EPANET 2.0®

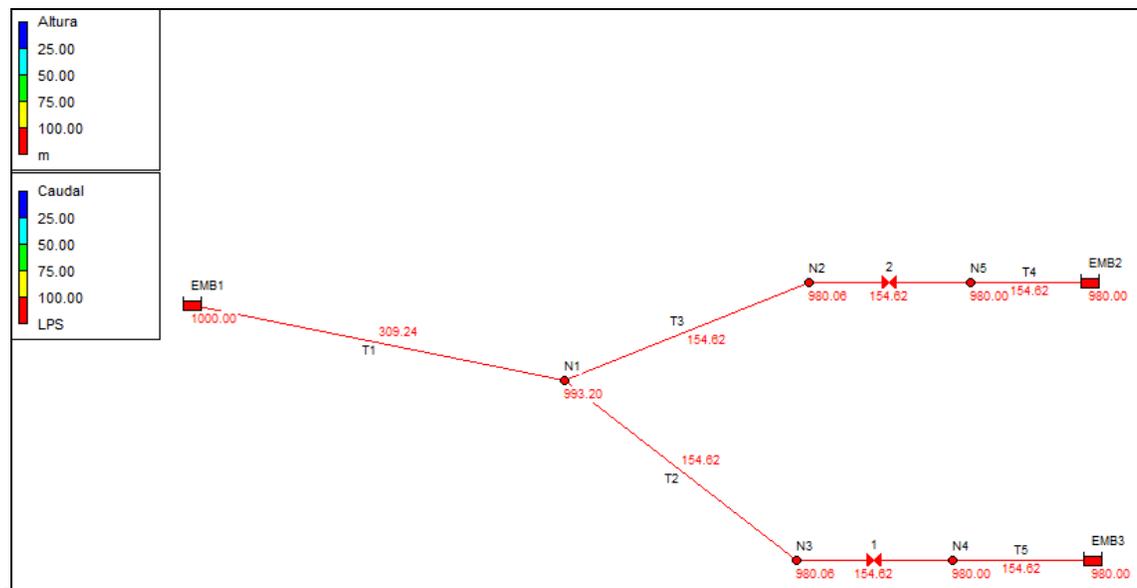


Tabla 10.1 Cálculos del K_1 de la válvula de compuerta.

% Apertura	K_1	Cd
100	0,11	0,95

- **Celeridad de la Onda y tiempo de paso (Δt).**

La celeridad de la onda se estimó con la ayuda de la Ecuación 4.3. Teniendo en cuenta el criterio de estabilidad de Courant se adoptó un valor de Δt de 0,677 s (véase Tabla 10.2)

Tabla 10.2 Cálculos del Δt , para un cierre simultáneo con válvulas de compuerta.

Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 3	Unidad
Módulo de elasticidad volumétrica	K	2,17E+06	2,17E+06	2,17E+06	KN/m ²
Densidad del agua	ρ	998,29	998,29	998,29	Kg/m ³
Módulo de elasticidad de la tubería	E	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	KN/m ²
Diámetro interno de la tubería	D	368	247	247	mm
Espesor de la tubería	e	19	13	13	mm
Velocidad de una onda sonora en la tubería	a	365,86	369,17	369,17	m/s
Numero de segmentos	n	2,00	2,00	2,00	-
Variación de longitud en el eje x	ΔX	250,00	250,00	250,00	m
Variación del tiempo ideal	Δt_i	0,683	0,677	0,677	s
Variación del tiempo usado	ΔT	0,677	0,677	0,677	s
Número de Courant		0,991	1,000	1,000	-

- **Factor de fricción y Constantes de cálculo.**

Para estimar los valores del factor de fricción se utilizó la ecuación de Colebrook-White (véase Ecuación 10.1)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 10.1}$$

Donde:

- k Es el valor de la rugosidad absoluta.
- D Es el diámetro interno de la tubería.
- Re Es el número de Reynolds.
- f es el factor de fricción de la tubería.

Las constantes B y R se estimaron con la ayuda de la Ecuación 4.11 y Ecuación 4.12. En la Tabla 10.3 se presentan los valores de los coeficientes mencionados.

Tabla 10.3 Cálculos de las constantes de cálculo, para un cierre simultáneo con válvulas de compuerta.

Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 3	Unidad
Diámetro interno de la tubería	D	368	247	247	mm
Rugosidad absoluta	Ks	0,0015	0,0015	0,0015	mm
Rugosidad relativa	ϵ/D	4,076E-06	6,073E-06	6,073E-06	-
Área interna de la tubería	A	0,11	0,05	0,05	m ²
Velocidad en flujo permanente	V	2,91	3,22	3,22	m/s
Numero de Reynolds	Re	1064292,22	792833,07	792833,07	-
Factor de fricción	f	0,01161	0,01223	0,01223	-

Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 3	Unidad
Velocidad de una onda sonora en la tubería	a	365,86	369,17	369,17	m/s
Contantes de cálculo	B	350,64	785,38	785,38	-
Contantes de cálculo	R	35,53	274,80	274,80	-
Tiempo de fase por tubería	T_{tub}	2,73	2,71	2,71	s
Periodo del sistema	T	5,44			s

10.1.2 Resultados del transitorio.

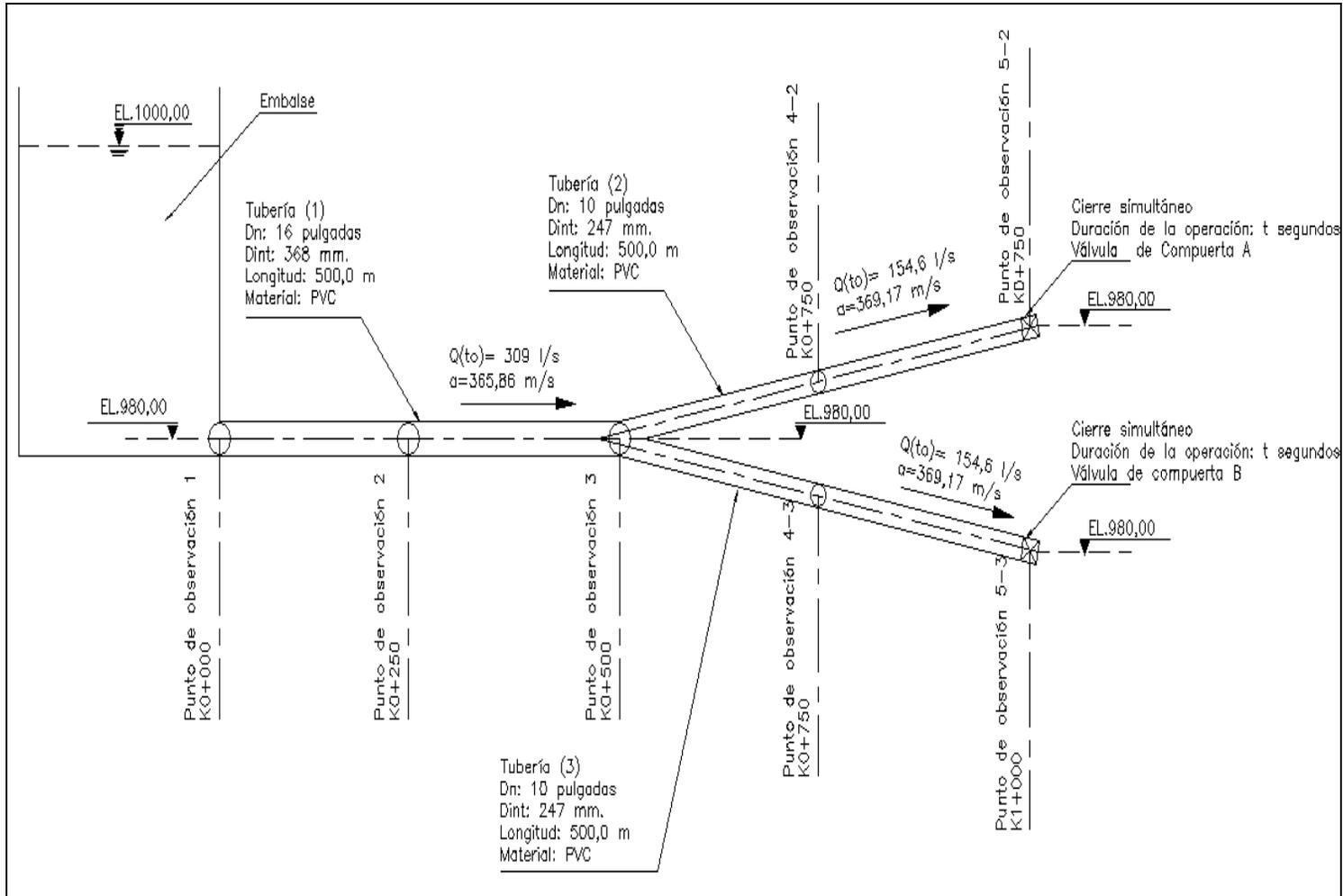
De acuerdo con los objetivos del presente documento, se realizó el cálculo para diferentes tiempos de cierre (véase Tabla 10.4), definidos a partir del periodo del sistema (T). El esquema topológico con la información necesaria para el cálculo del transitorio se presenta en la Figura 10.2.

El cálculo detallado del transitorio de la operación simultánea con válvulas de compuerta, para los diferentes tiempos de cierre evaluados, se presenta en el Anexo A.

Tabla 10.4 Tiempos de cierre simultáneo evaluados. Válvulas de compuerta.

Tipo de cierre	Tipo de válvula	Tiempo de cierre (t)
Simultaneo	Compuerta	1T
		2T
		3T
		4T
		6T
		8T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
		100T

Figura 10.2 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de compuerta



Inicialmente se revisaron las piezométricas mínimas a lo largo de la tubería (véase Figura 10.3) y se encontró que para tiempos muy cortos de cierre, las tuberías 2, 3 y parte de la 1 presentan separación de columna, debido a que la presión local podría estar por debajo de la presión de vapor. Por el contrario, para tiempos de cierre relativamente largos, que para el sistema analizado son mayores a 20 veces el periodo del sistema, la presión mínima local de la tubería no logra producir la evaporización del agua en ningún punto.

En segundo lugar, al verificar las envolventes de piezométricas máximas para diferentes tiempos de cierre (véase Figura 10.4), se observó que maniobras muy rápidas no solo generan sobrepresiones altas en el sitio del obturador, sino que además, la onda de sobrepresión en la tubería se traslada al resto del sistema sin una reducción importante de su valor pico. Esto permite concluir, que para tiempos de cierre muy pequeños las fuerzas de fricción no logran disipar el efecto de la sobrepresión, en el esquema analizado. Es decir, que para maniobras con t aproximadamente cero, el esquema analizado podría presentar la misma presión máxima en todos los puntos del sistema de distribución.

Por el contrario, cuando los tiempos de cierre son muy largos se realiza una transición gradual de flujo permanente a la condición de presión hidrostática. En el caso del sistema analizado, se logra un cambio suave de presiones con tiempos de cierre mayores a 50T.

Figura 10.3 Envolventes de piezométricas mínimas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.

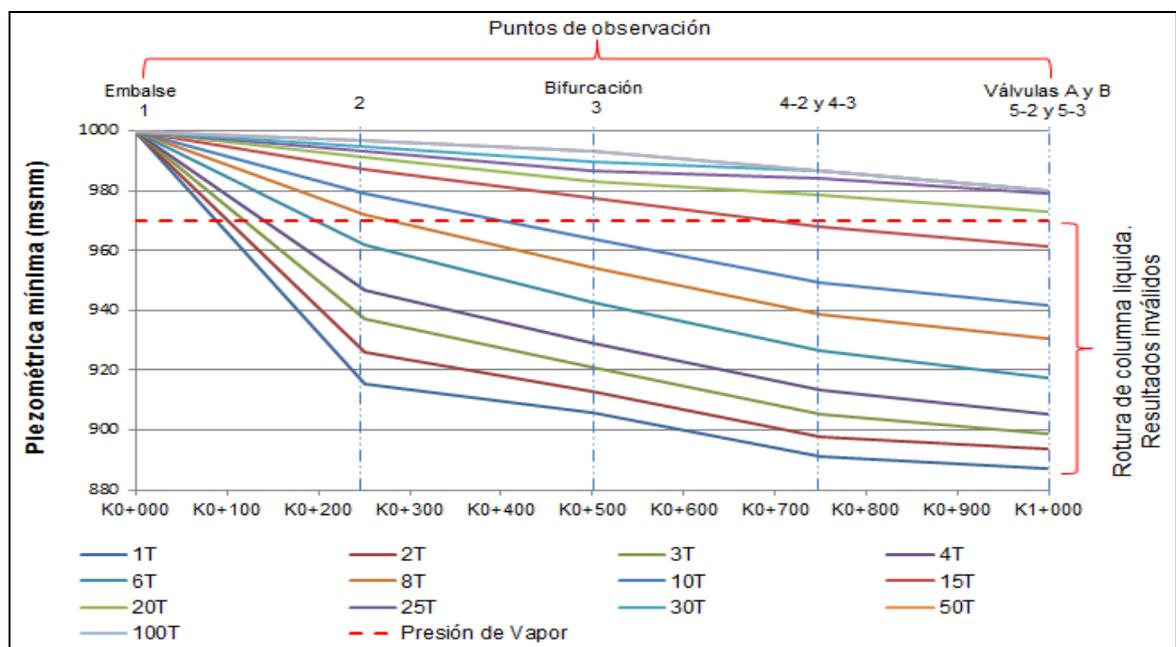
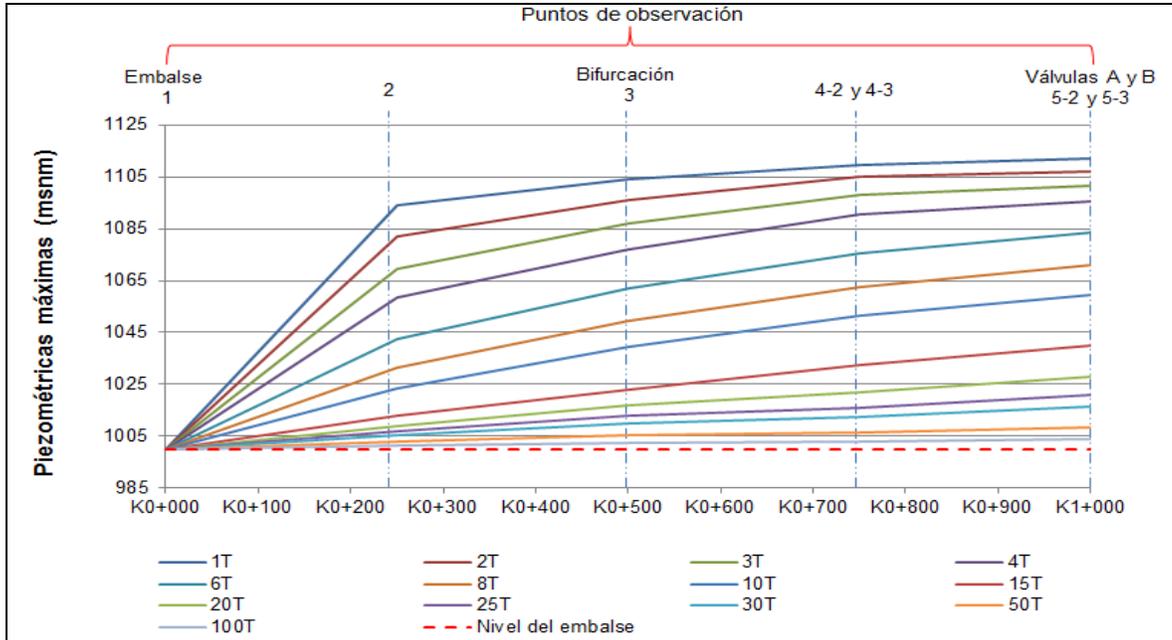


Figura 10.4 Envoltentes de piezométricas máximas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



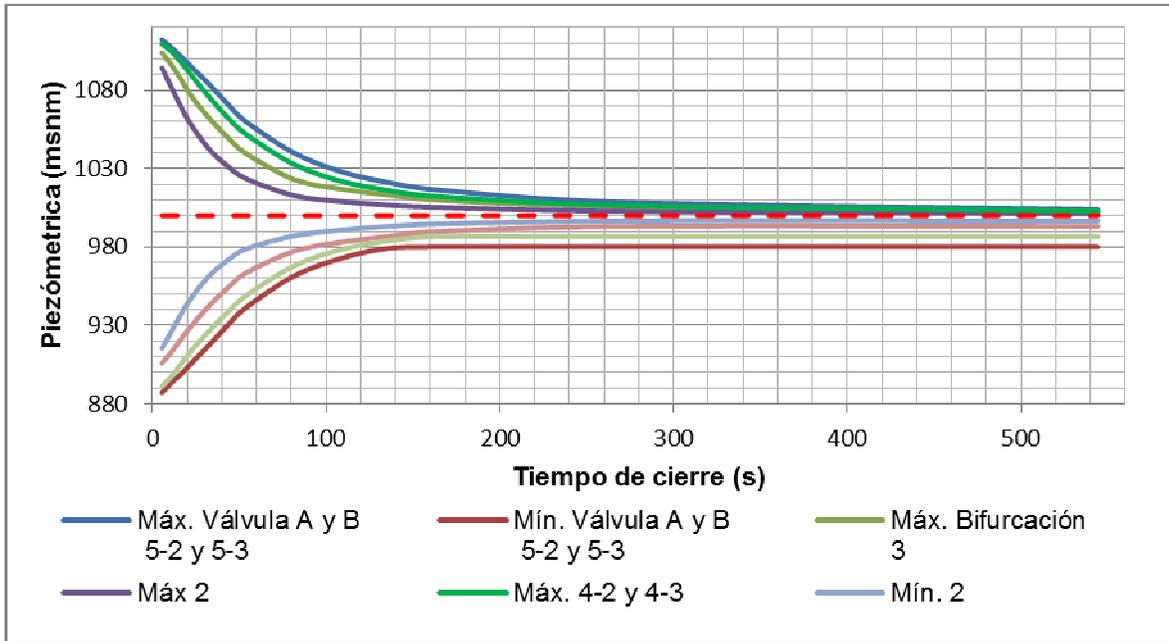
Finalmente, al revisar el comportamiento de la altura piezométrica en cada de punto de observación, para las diferentes tiempos de cierre evaluados, se pudo apreciar que existe un tiempo para el cual la variación de los máximos y mínimos son insignificantes (véase Figura 10.5) y no representan peligro para la estabilidad estructural de la tubería. Dicho punto se puede determinar a partir de una gráfica de altura piezométrica vs tiempo de cierre, obtenidas a partir de los de los máximos y mínimos de altura piezométrica registrados en las diferentes simulaciones, en cada punto de observación, como el instante en el cual la pendiente de la curva que describe el comportamiento de cada punto de observación está próxima a cero. Siendo el puntos más crítico el más cercano al obturador en el caso de las sobrepresiones y el más alejado para las subpresiones.

En el caso del sistema de distribución analizado, el tiempo recomendado para cierre seria 136 s (25T).

Si la maniobra de cierre simultáneo se realiza con el tiempo estimado de la forma anteriormente mencionada, se garantiza una transición suave entre los valores de la presión en régimen permanente al valor de la presión hidrostática (1000 msnm en este caso), por lo cual no se presentarían sobrepresiones y se evitaría el problema detectado en la

Figura 10.4. Además, la piezométrica mínima en todos los puntos de observación será el valor en régimen permanente, lo que garantiza que la presión no disminuya hasta el valor de vaporización, como se muestra en la Figura 10.5.

Figura 10.5 Envolventes de alturas piezométricas para cierres simultáneos. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el embalse y las válvulas.



10.2 CIERRE DESFASADO CON VÁLVULA DE COMPUERTA

La maniobra analizada, en el presente subcapítulo, corresponde al evento en el cual los dos ramales se encuentran trabajando con sus válvulas de compuerta completamente abiertas y en un instante cualquiera se inicia la acción de cierre en la compuerta de la tubería No 2. En el momento en que finaliza el cierre de esta válvula empieza el cierre de la segunda válvula, la cual está localizada aguas abajo de la tubería No 3. La maniobra en los dos órganos de control se desarrolla en el mismo tiempo t .

10.2.1 Cálculos preliminares.

Considerando que la condición inicial de la maniobra de cierre simultánea y desfasada son iguales, los cálculos preliminares para el cierre desfasado son las mismas que se presentaron en el numeral 10.1.1.

10.2.2 Resultados del transitorio.

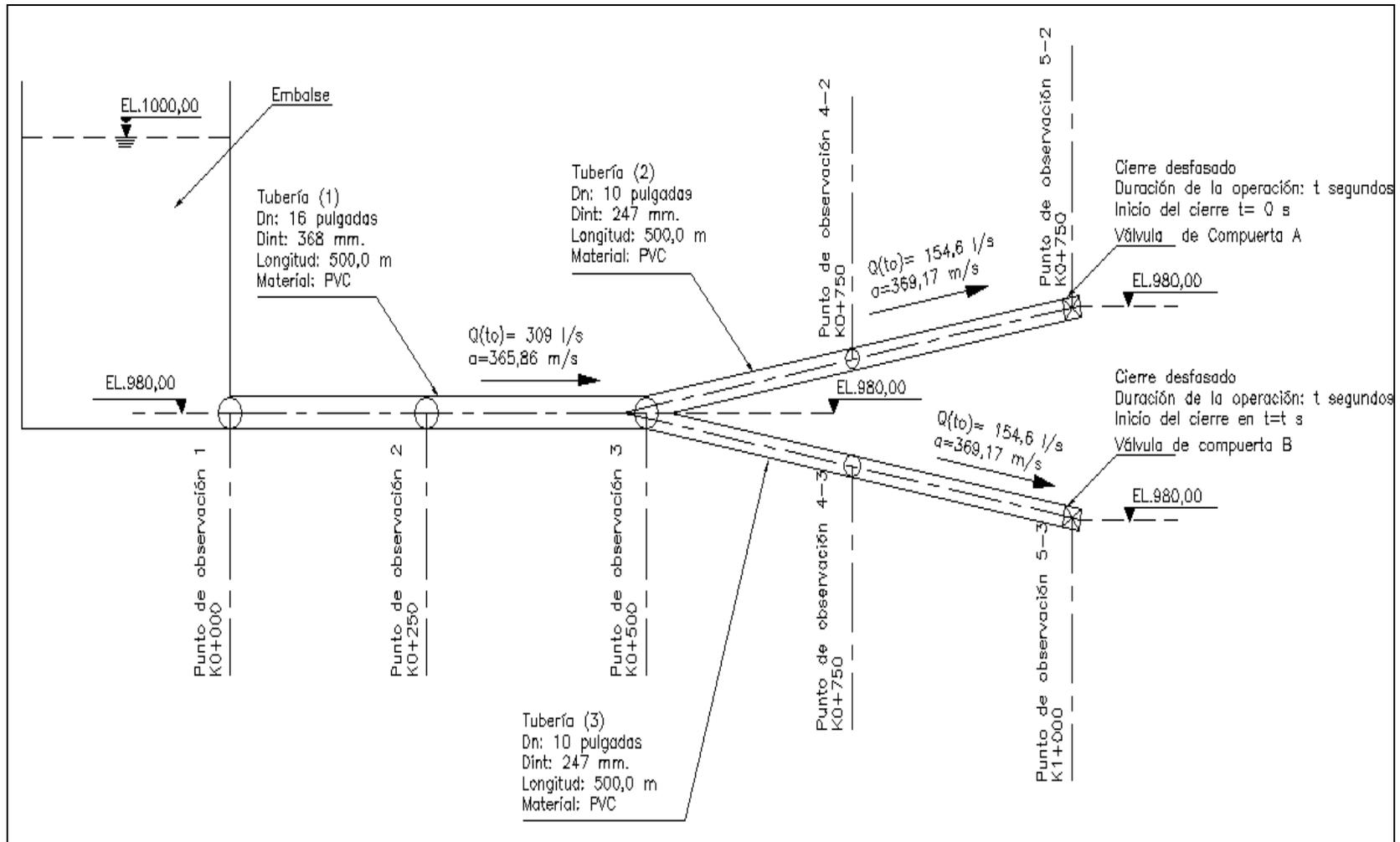
Similarmente a lo realizado para el cierre simultáneo, el análisis se elaboró para diferentes tiempos de cierre (véase Tabla 10.5), definidos a partir del periodo del sistema (T). El esquema topológico con la información necesaria para el cálculo del transitorio se presenta en la Figura 10.6.

El cálculo detallado del transitorio de la operación desfasada con válvulas de compuerta, para los diferentes tiempos de cierre evaluados, se presenta en el Anexo B.

Tabla 10.5 Tiempos de cierre desfasados evaluados. Válvulas de compuerta.

Tipo de cierre	Tipo de válvula	Tiempo de cierre (t)
Desfasado	Compuerta	1T
		2T
		3T
		4T
		5T
		6T
		7T
		8T
		9T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
100T		

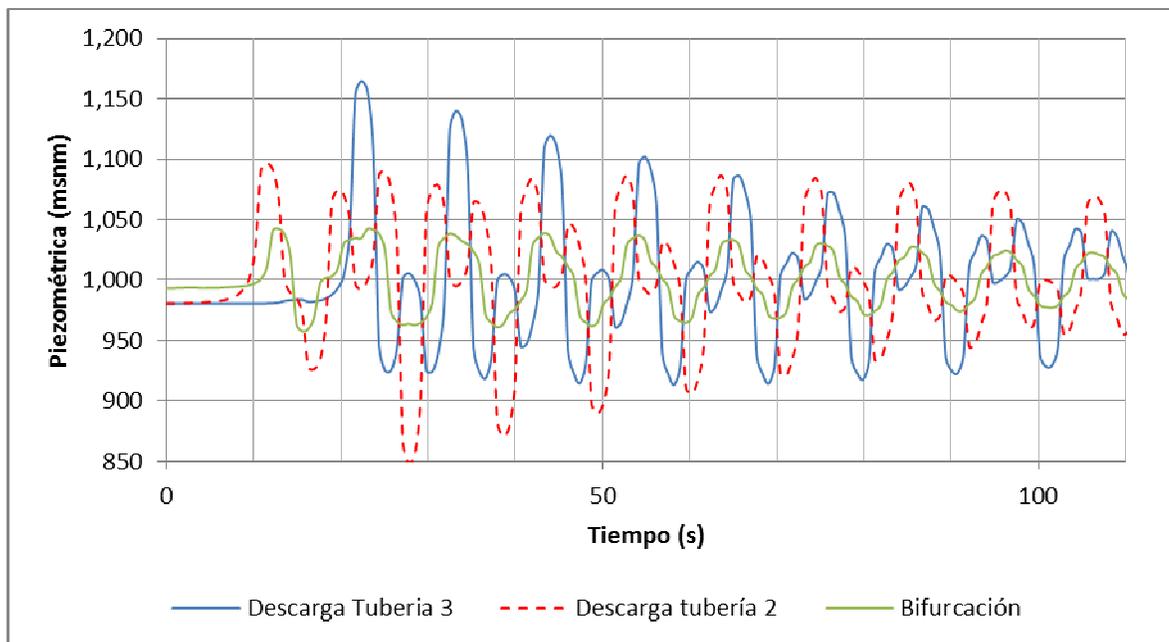
Figura 10.6 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de compuerta



Inicialmente se valoró la consecuencia de la superposición de los efectos del cierre de las dos válvulas, ya que con este tipo de maniobra se espera que haya un encuentro de una onda de depresión con una de sobrepresión, en el punto de la bifurcación. En Figura 10.7 se puede apreciar que un pico en la piezométrica de la descarga de la tubería 3 se presenta simultáneamente con un valle en la válvula del ducto 2 y viceversa. El efecto local en las zonas próximas a las descargar se evidencia en que los valores máximos en cualquier ramal le corresponde un valor mínimo, en su similar, que tiene una magnitud mucho menor que el valle anterior y el siguiente, e inversamente. Esta situación evidencia que la piezométrica de mayor valor absoluto frena el efecto en el otro ramal.

Adicionalmente, se puede apreciar en la Figura 10.7, que la piezométrica en la bifurcación oscila entre los mismos valores, lo que sugiere que gracias a la superposición de las ondas, este punto del sistema conserva la energía suministrada por la señal emitida en el primer cierre durante periodo prolongado de tiempo, a diferencia de los puntos de la descarga en los cuales la energía se reduce notablemente con el transcurrir de los segundos.

Figura 10.7 Comportamiento típico de la altura piezométrica en los puntos clave del sistema para cierre desfasado. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías.



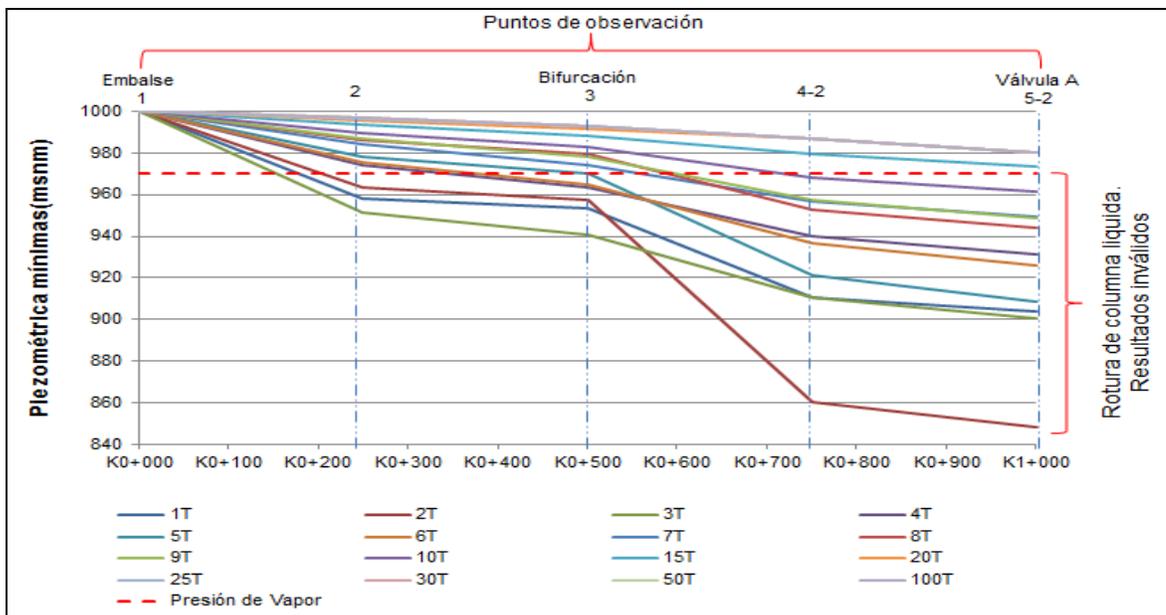
En segundo lugar, al revisar las piezométricas mínimas sobre el eje de la tubería 2 (véase Figura 10.8) y las correspondientes a lo largo de la tubería No 3 (véase Figura 10.9), se encontró, al igual que para el cierre simultáneo, para

tiempos muy cortos de cierre, las tuberías 2, 3 y parte de la 1 presentan separación de columna, debido a que la presión local podría estar por debajo de la presión de vapor. Por el contrario, para tiempos de cierre relativamente largos, la presión mínima local de la tubería no logra producir la evaporización del agua en ningún punto

La diferencia con la maniobra de cierre simultáneo radica en que los valores mínimos generales esperados en el sistema podrían ser más bajos. Sin embargo, con tiempos de cierre ligeramente más cortos se consigue que la presión mínima local de la tubería este por encima del valor de la vaporización; en el esquema analizado este punto se logra para cierre simultaneo a los 20T, mientras que para el cierre desfasado se puede obtener con 15T (véase Figura 10.8).

Además, se puede apreciar que el cierre desfasado genera una inestabilidad del comportamiento de la piezométrica mínima, originada en la superposición de los efectos, a tal punto que para cierres cortos, las presiones en los ramales aguas abajo de la bifurcación pueden ser más críticas para tiempos un T mayor, como muestra para las maniobras de 1T y 2T en la Figura 10.8 y 1T y 3T en la Figura 10.9.

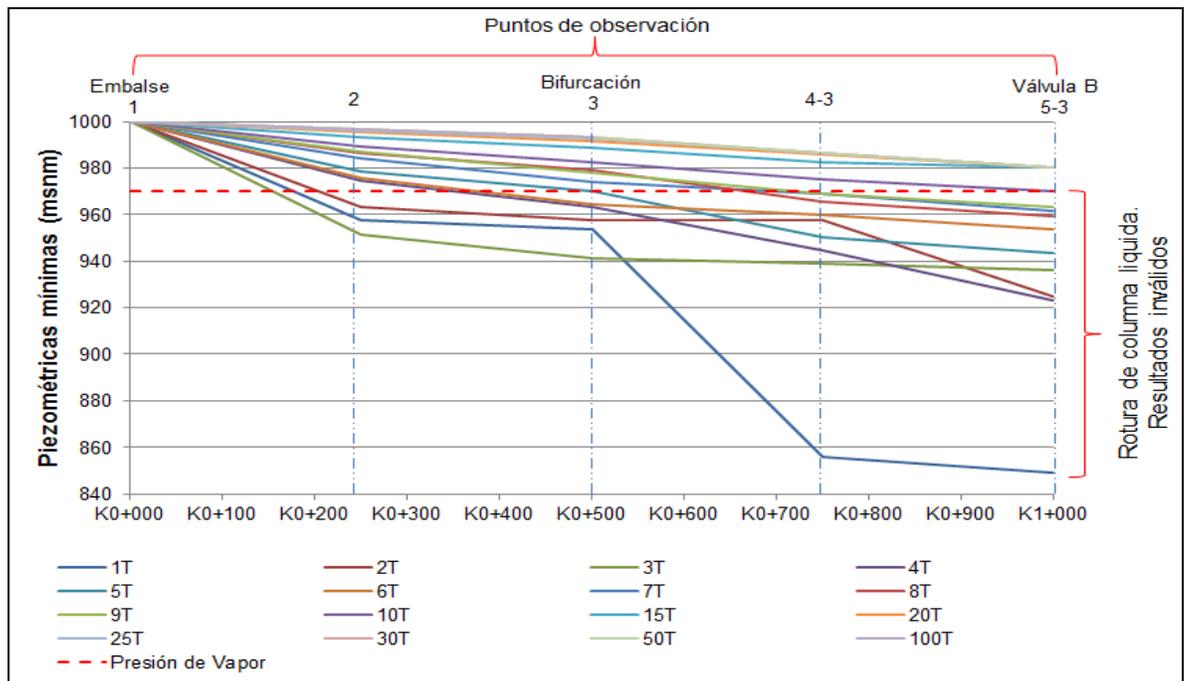
Figura 10.8 Envoltentes de piezométricas mínimas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



De igual forma, al comparar el comportamiento entre los dos ramales, en la operación de cierre desfasada, se identificó que el rango de tiempos entre el que producen el mínimo general y los que evitan la presión de vapor, son más críticos

en la tubería en la que se realiza primero el cierre (No 2), dado que se obtiene presiones más grandes en el esquema analizado.

Figura 10.9 Envoltentes de piezométricas mínimas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



En tercer lugar, al verificar las envolventes de piezométricas máximas para diferentes tiempos de cierre (véase Figura 10.10 y Figura 10.11), se observó que se presentan presiones más altas que las registradas para el cierre simultáneo, con maniobras muy rápidas: en el caso de la tubería 2 el tiempo de crítico fue de un 1T, mientras que para la No 3 se obtuvo con 2T, en el esquema analizado. En los demás tiempos de cierre evaluados las alturas piezométricas máximas son del mismo orden de magnitud a las presentadas en el cierre simultáneo.

De forma análoga con las piezométrica mínimas, se apreció que el cierre desfasado genera una inestabilidad del comportamiento de la piezométrica máxima, originada en la superposición de los efectos. La singularidad hace que un tiempo de cierre cualquiera no genere presiones máximas mayores que una maniobra más lenta, como es el caso de las operaciones 1T y 3T en la Figura 10.10 y Figura 10.11.

Figura 10.10 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.

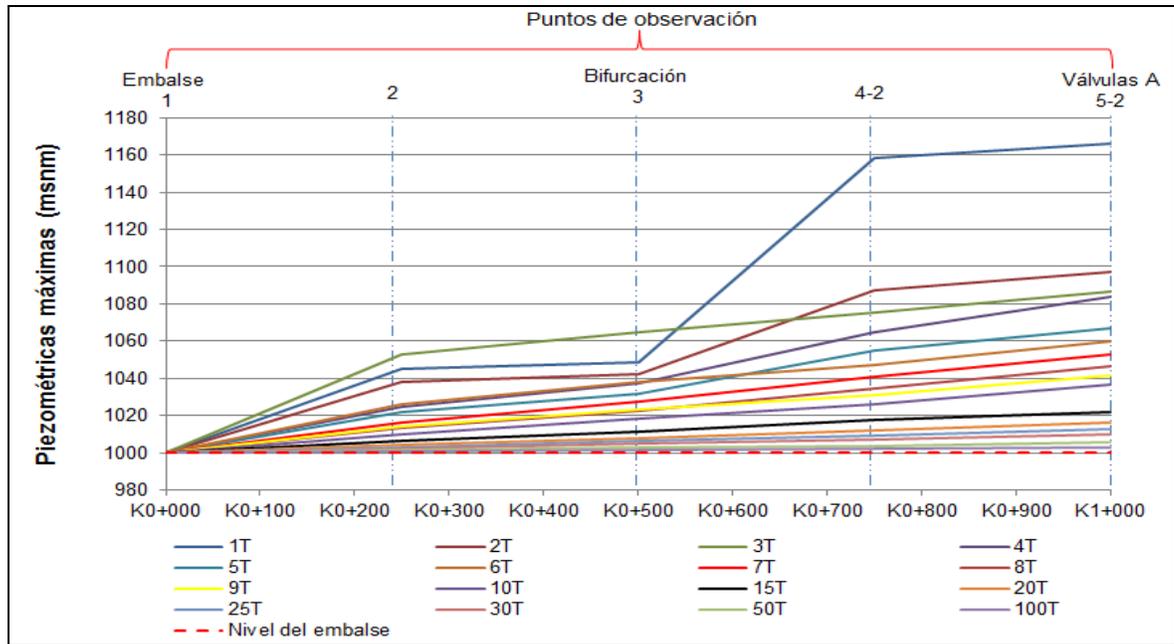
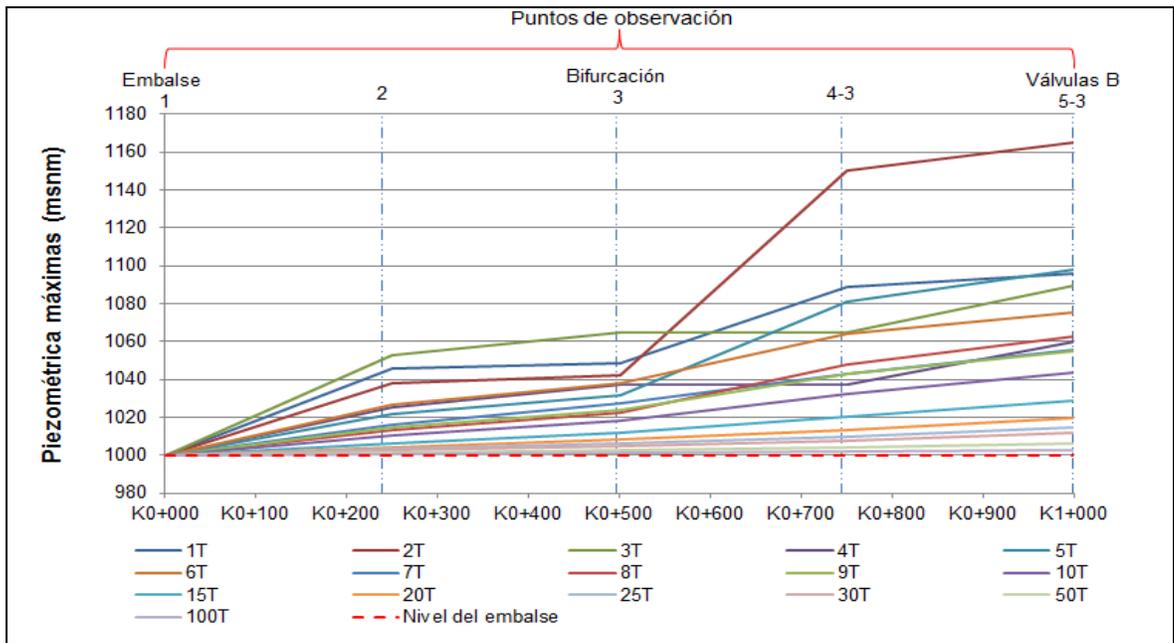


Figura 10.11 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



Finalmente, al analizar las envolventes de alturas piezométricas en los diferentes puntos de medición se observa que existe un punto a partir del cual los cambios de presiones positivas o negativas no son significativas (véase Figura 10.12 y Figura 10.13) y no representan peligro para la estabilidad de la tubería. Dicho punto se puede determinar a partir de una gráfica de altura piezométrica vs tiempo de cierre, obtenida a partir de los máximos y mínimos de altura piezométrica registrados en las diferentes simulaciones, en cada punto de observación, como el instante en el cual la pendiente de la curva que describe el comportamiento de cada punto de observación está próxima a cero. Siendo el punto más crítico el más cercano al obturador en el caso de las sobrepresiones y el más alejado para las sub-presiones.

En el caso del sistema de distribución analizado, el tiempo recomendado para un cierre desfasado sería 80 s (15T), aproximadamente.

Al igual que en el cierre simultáneo, al realizar el cierre con el tiempo estimado con la anterior metodología, se garantiza una transición suave de las condiciones de flujo permanente a las condiciones hidrostáticas, sin verse afectados por las inestabilidades originadas en el desfase de tiempos de cierre muy pequeños (véase Figura 10.12 y Figura 10.13).

Figura 10.12 Envolventes de alturas piezométricas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.

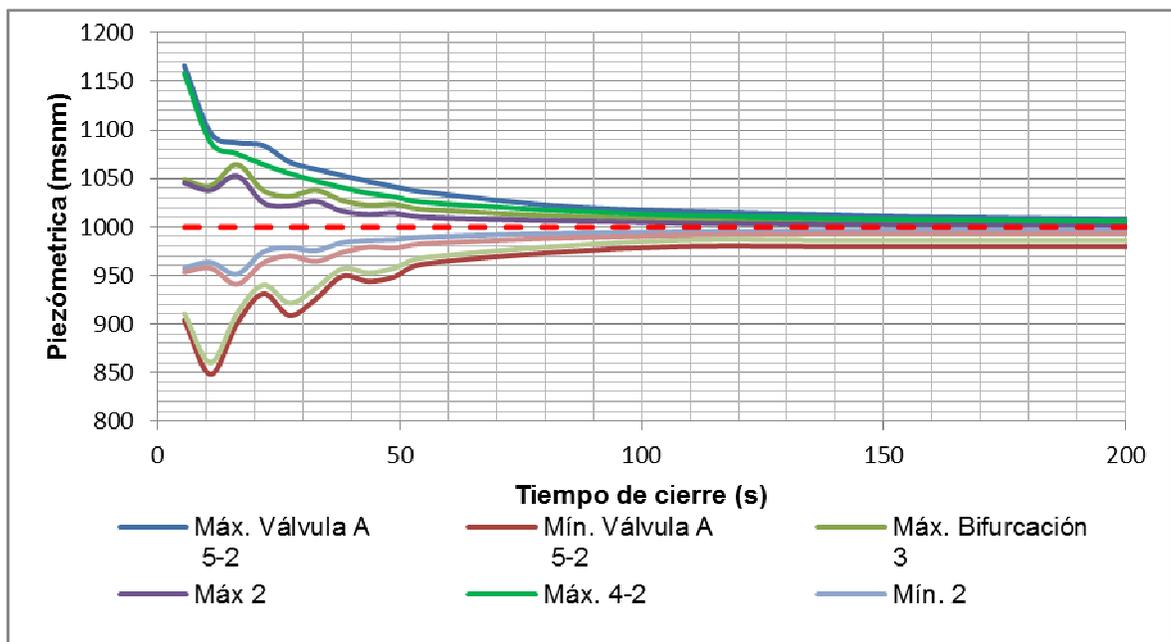
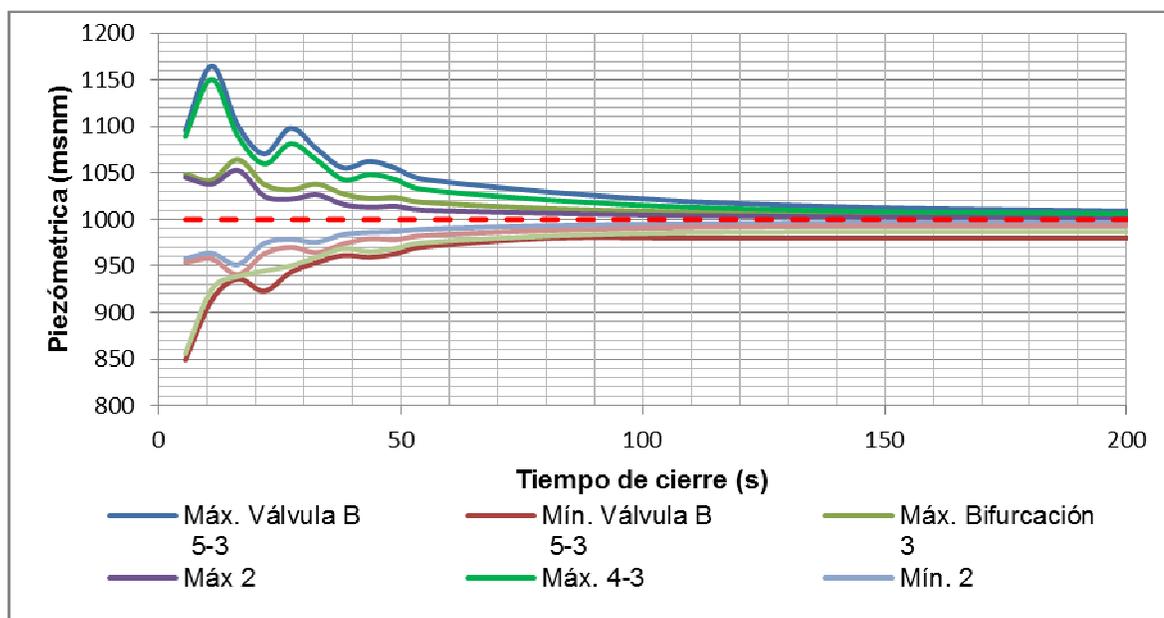


Figura 10.13 Envolventes de alturas piezométricas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.



10.3 CIERRE SIMULTÁNEO CON VÁLVULA DE MARIPOSA

La maniobra evaluada, en el presente subcapítulo, corresponde al evento en el cual los dos ramales se encuentran trabajando con sus válvulas de mariposa completamente abiertas y seguidamente estas se cierran completamente, en el mismo tiempo t.

10.3.1 Cálculos preliminares

Los cálculos preliminares para el esquema con válvulas de mariposa se realizaron siguiendo la misma metodología presentada en el numeral 10.1.1 y se presentan en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6 Cálculos preliminares para un cierre simultáneo con válvulas de mariposa.

Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 2	Unidad
Longitud de la tubería	L1	500	500	500	m
Diámetro interno de la tubería	D	368	247	247	mm
Espesor de la tubería	e	19	13	13	mm
Rugosidad absoluta	Ks	0,0015	0,0015	0,0015	mm
Caudal en flujo permanente	Q	306,36	153,18	153,18	L/s

Descripción	Símbolo	Tubería 1	Tubería 2	Tubería 2	Unidad
Rugosidad relativa	ε/D	4,07609E-06	6,07287E-06	6,07287E-06	-
Área interna de la tubería	A	0,1064	0,0479	0,0479	m ²
Velocidad en flujo permanente	V	2,8804	3,1968	3,1968	m/s
Numero de Reynolds	Re	1054994,386	785906,749	785906,749	-
Factor de fricción	f	0,0116	0,0122	0,0122	-
Velocidad de una onda sonora en la tubería	a	365,86	369,17	369,17	m/s
Numero de segmentos	n	2	2	2	-
Variación de longitud en el eje x	ΔX	250	250	250	m
Variación del tiempo ideal	Δt_i	0,683312954	0,677186793	0,677186793	s
Variación del tiempo usado	ΔT	0,677	0,677	0,677	s
Número de Courant		0,99	1,00	1,00	-
Constante de cálculo	B	350,64	785,38	785,38	-
Constante de cálculo	R	35,58	275,20	275,20	-

10.3.2 Resultado del transitorio

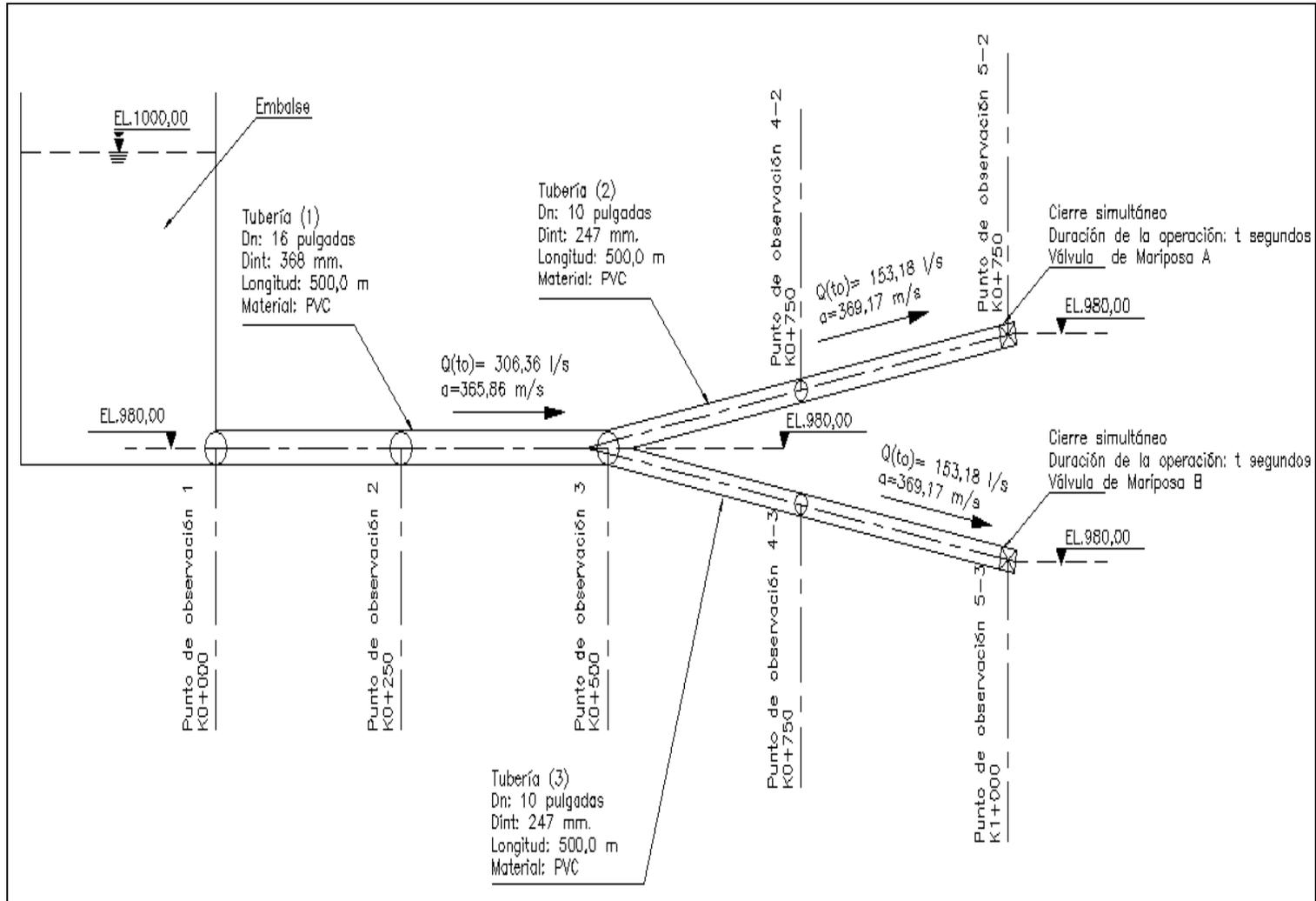
Similarmente a los escenarios analizados con válvulas de compuerta, se realizó el cálculo para diferentes tiempos de cierre (véase Tabla 10.7), definidos a partir del periodo del sistema (T). El esquema topológico con la información necesaria para el cálculo del transitorio se presenta en la Figura 10.14

El cálculo detallado del transitorio de la operación simultánea con válvulas de mariposa, para los diferentes tiempos de cierre evaluados, se presenta en el Anexo C

Tabla 10.7 Tiempos de cierre simultáneo evaluados. Válvulas de mariposa.

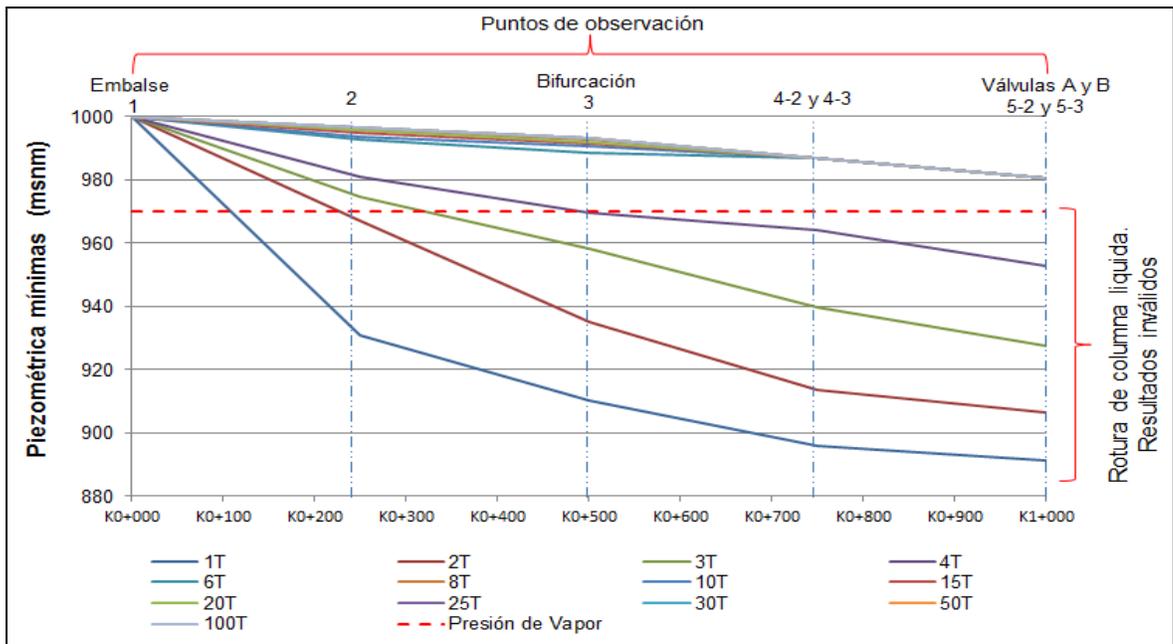
Tipo de cierre	Tipo de válvula	Tiempo de cierre (t)
Simultaneo	Mariposa	1T
		2T
		3T
		4T
		6T
		8T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
		100T

Figura 10.14 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de mariposa.



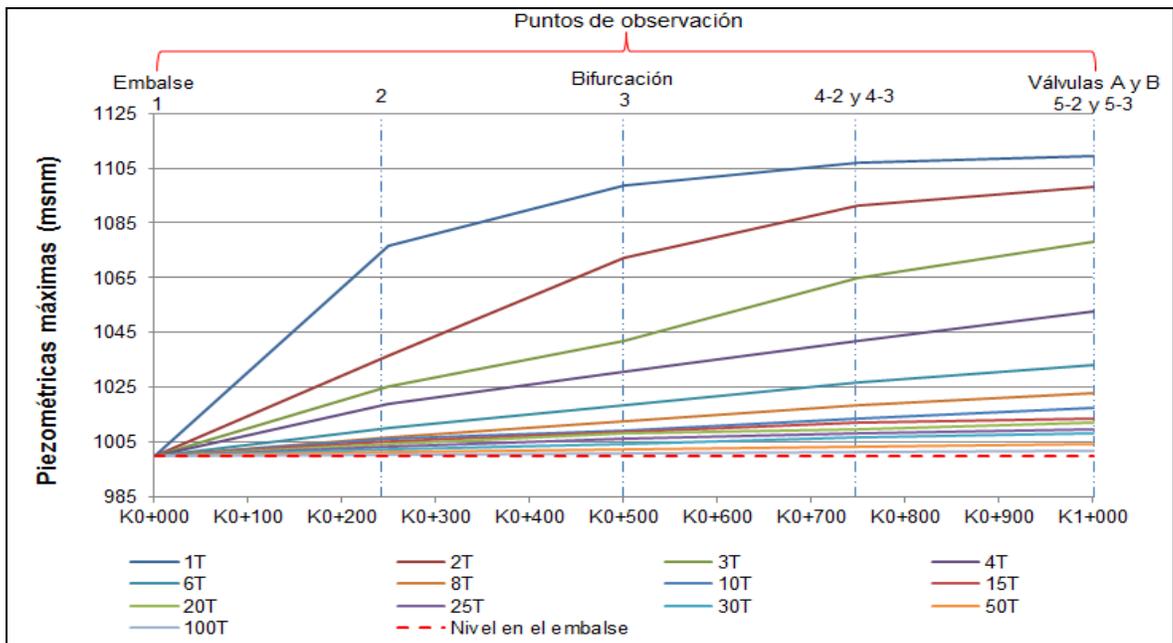
Inicialmente se revisaron las piezométricas mínimas a lo largo de la tubería (véase Figura 10.15) y se encontró que el comportamiento es similar a cuando se utiliza una válvula de compuerta, ya que para tiempos muy cortos de cierre, las tuberías 2, 3 y parte de la 1 presentan separación de columna, debido a que la presión local podría estar por debajo de la presión de vapor. Sin embargo, los tiempos de cierre con los cuales se garantiza que la presión mínima local de la tubería no produzca evaporización del agua en ningún punto y se aproxime a los valores que se presentan en flujo permanente, son tiempos relativamente cortos, en comparación con los requeridos con la primera válvula analizada. Para el sistema analizado son mayores a 6 veces el periodo del sistema, mientras que en el anterior esquema esto solo se lograba a partir de 20T.

Figura 10.15 Envolventes de piezométricas mínimas para cierres simultáneos. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



Al analizar la Figura 10.16, se encontró que maniobras muy rápidas no permiten el traslado de las sobrepresiones altas desde el sitio del obturador al resto del sistema, con la misma eficiencia mostrada por el sistema cuando el órgano de control es una válvula de compuerta. Adicionalmente, no se requerían tiempos de cierre muy largos para realizar una transición gradual de flujo permanente a la condición de presión hidrostática, como en el caso del sistema con válvulas de compuerta analizado, en donde se requerían tiempos de cierre mayores a 50T. En este caso con una maniobra de 8T de duración sería posible realizar la misma acción.

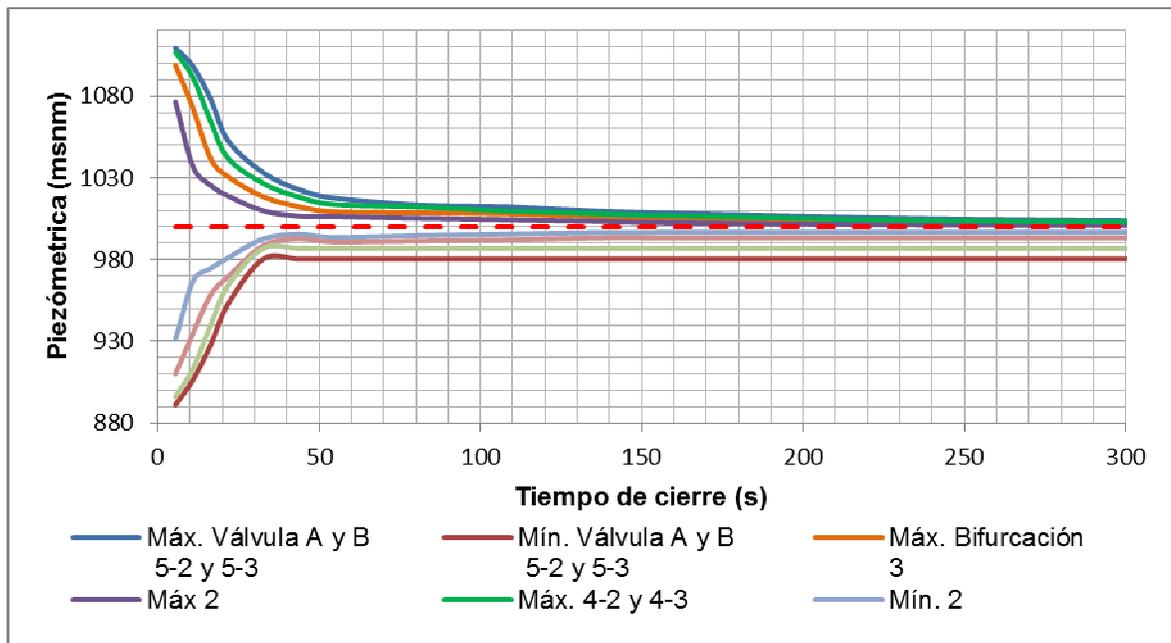
Figura 10.16 Envolventes de piezométricas máximas para cierres simultáneos. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



Finalmente, al revisar el comportamiento de la altura piezométrica en cada de punto de observación, para las diferentes tiempos de cierre evaluados, se pudo apreciar que el tiempo para el cual la variación de los máximos y mínimos son insignificantes (véase Figura 10.17) se reducen notoriamente, en comparación con la maniobra de cierre simultáneo con válvulas de compuerta. Dicho punto se puede determinar a partir de una gráfica de altura piezométrica vs tiempo de cierre, obtenida de los de los máximos y mínimos de altura piezométrica registrados en las diferentes simulaciones, en cada punto de observación, como el instante en el cual la pendiente de la curva que describe el comportamiento de cada punto de observación está próxima a cero. Siendo el puntos más crítico el más cercano al obturador en el caso de las sobrepresiones y el más alejado para las sub-presiones.

En el caso del sistema de distribución analizado, el tiempo recomendado para cierre sería 50 s (10T).

Figura 10.17 Envolventes de alturas piezométricas para cierres simultáneos. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.



10.4 CIERRE DESFASADO CON VÁLVULA DE MARIPOSA

La maniobra analizada, en el presente subcapítulo, corresponde al evento en el cual los dos ramales se encuentran trabajando con sus válvulas de compuerta completamente abiertas y en un instante cualquiera se inicia la acción de cierre en la compuerta de la tubería No 2. En el momento en que finaliza el cierre de esta válvula se empieza el cierre de la segunda válvula, la cual está localizada aguas abajo de la tubería No 3. La maniobra en los dos órganos de control se desarrolla en el mismo tiempo t.

10.4.1 Cálculos preliminares.

Considerando que la condición inicial de la maniobra simultánea y desfasada son iguales, los cálculos preliminares para el cierre desfasado son las mismas que se presentaron en el numeral 10.3.1.

10.4.2 Resultados del transitorio.

Similarmente a lo realizado para el cierre simultáneo, el análisis se elaboró para diferentes tiempos de cierre (véase Tabla 10.8), definidos a partir del periodo del

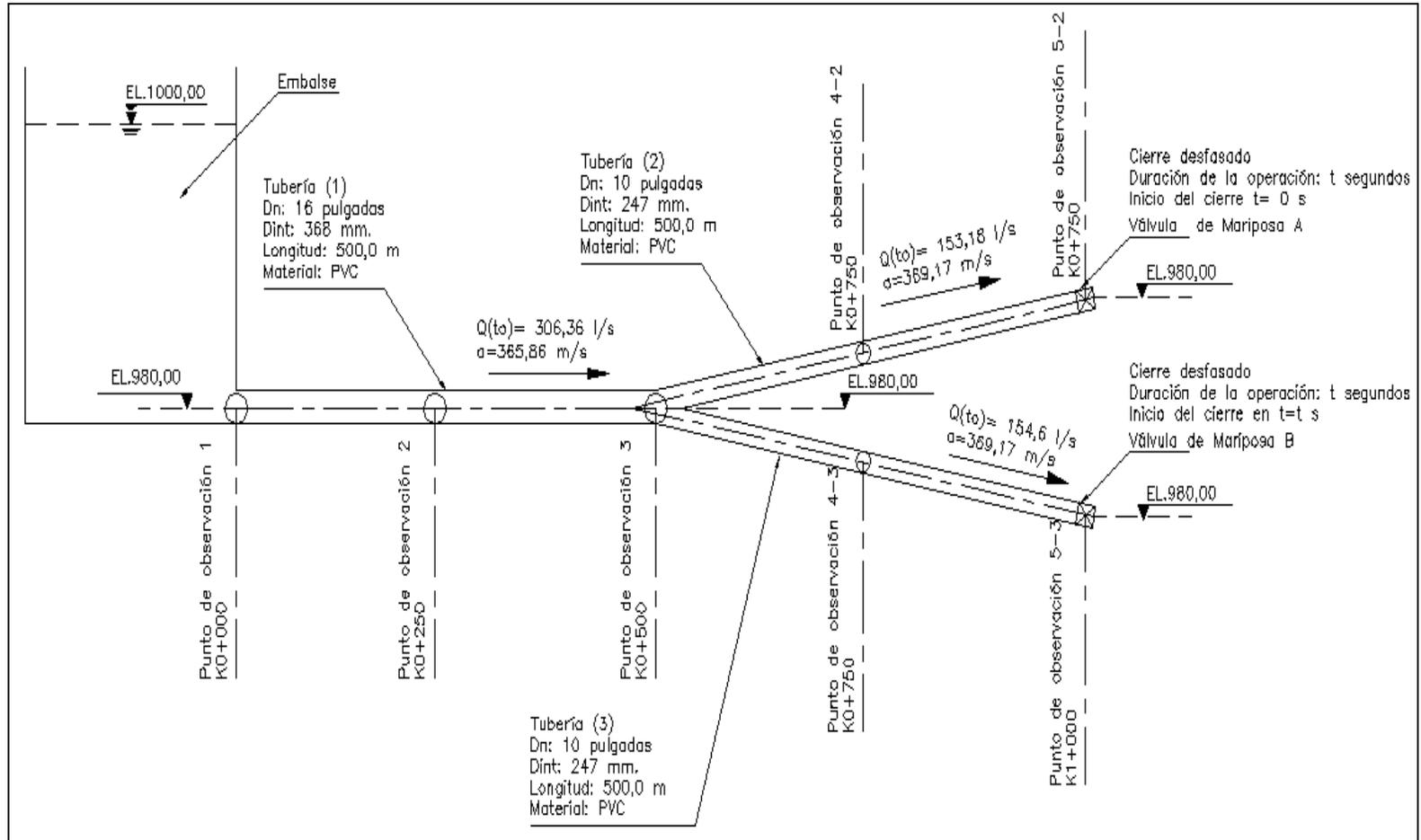
sistema (T). El esquema topológico con la información necesaria para el cálculo del transitorio se presenta en la Figura 10.18.

El cálculo detallado del transitorio de la operación desfasada con válvulas de mariposa, para los diferentes tiempos de cierre evaluados, se presenta en el Anexo D.

Tabla 10.8 Tiempos de cierre desfasados evaluados. Válvulas de mariposa.

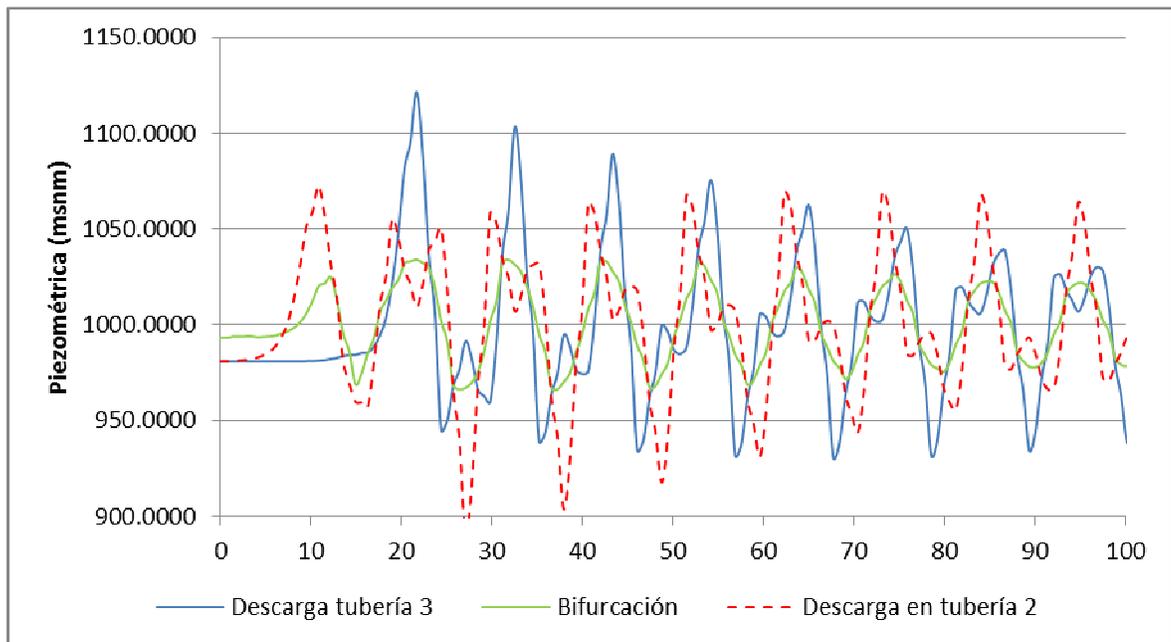
Tipo de cierre	Tipo de válvula	Tiempo de cierre (t)
Desfasado	Mariposas	1T
		2T
		3T
		4T
		5T
		6T
		7T
		8T
		9T
		10T
		15T
		20T
		25T
		30T
		50T
100T		

Figura 10.18 Esquema topológico del transitorio. Cierre simultaneo. Válvulas de mariposa.



Inicialmente se valoró la consecuencia de la superposición de los efectos de apertura y cierre de las dos válvulas, ya que con este tipo de maniobra se espera que haya un encuentro de una onda de descompresión con una de sobrepresión, en el punto de la bifurcación. A partir de la información mostrada en la Figura 10.19, se puede establecer que el comportamiento de la piezométrica sigue el mismo patrón descrito para el sistema cuando utiliza válvulas de compuerta. Es decir, la piezométrica de mayor valor absoluto frena el efecto en el otro ramal y la superposición de las ondas, en este punto del sistema conserva la energía suministrada por la señal emitida en el primer cierre durante periodo prolongado de tiempo, a diferencia de los puntos de la descarga en los cuales la energía se reduce notablemente con el transcurrir de los segundos.

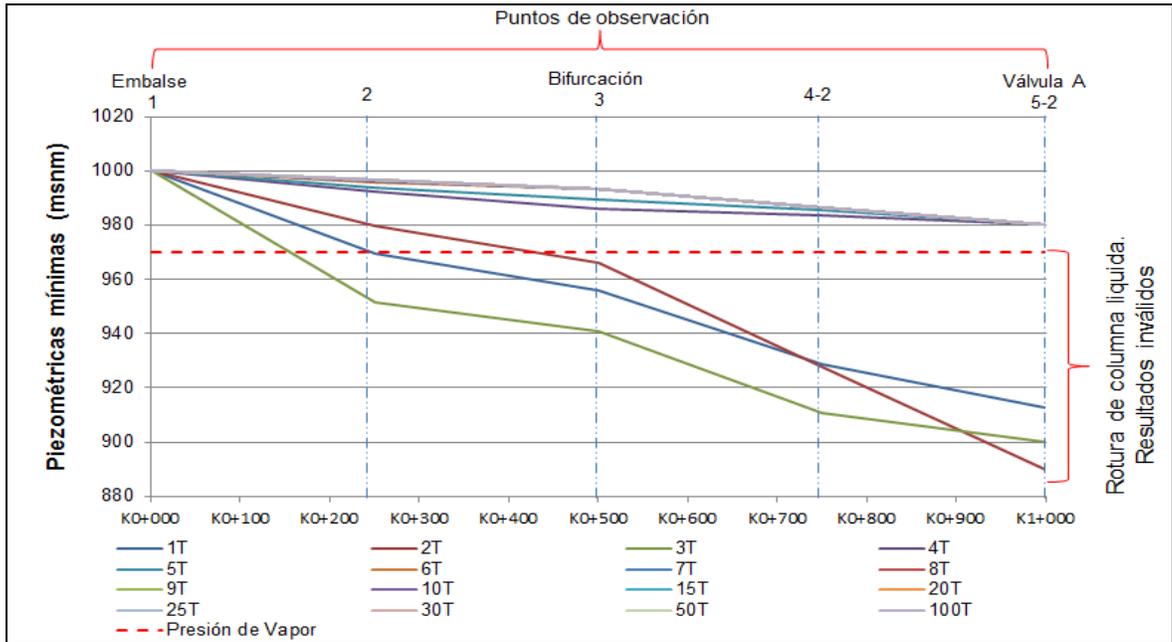
Figura 10.19 Comportamiento típico de la altura piezométrica en los puntos clave del sistema, para cierre desfasado. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías.



En segundo lugar, al revisar las piezométricas mínimas sobre el eje de la tubería 2 (véase Figura 10.20) y las correspondientes a lo largo de la tubería No 3 (véase Figura 10.21), se encontró que el comportamiento es similar a cuando se utiliza una válvula de compuerta, ya que para tiempos muy cortos de cierre, las tuberías 2, 3 y parte de la 1 presentan separación de columna, debido a que la presión local podría estar por debajo de la presión de vapor. Sin embargo, los tiempos de cierre con los cuales se garantiza que la presión mínima local de la tubería no produzca evaporización del agua en ningún punto y se aproxime a los valores que se presentan en flujo permanente, son tiempos relativamente cortos, en comparación con los requeridos con la primera válvula analizada. Para el

sistema analizado con válvulas de mariposa son mayores a 4 veces el periodo del sistema, mientras que en el anterior esquema esto solo se lograba a partir de 15T.

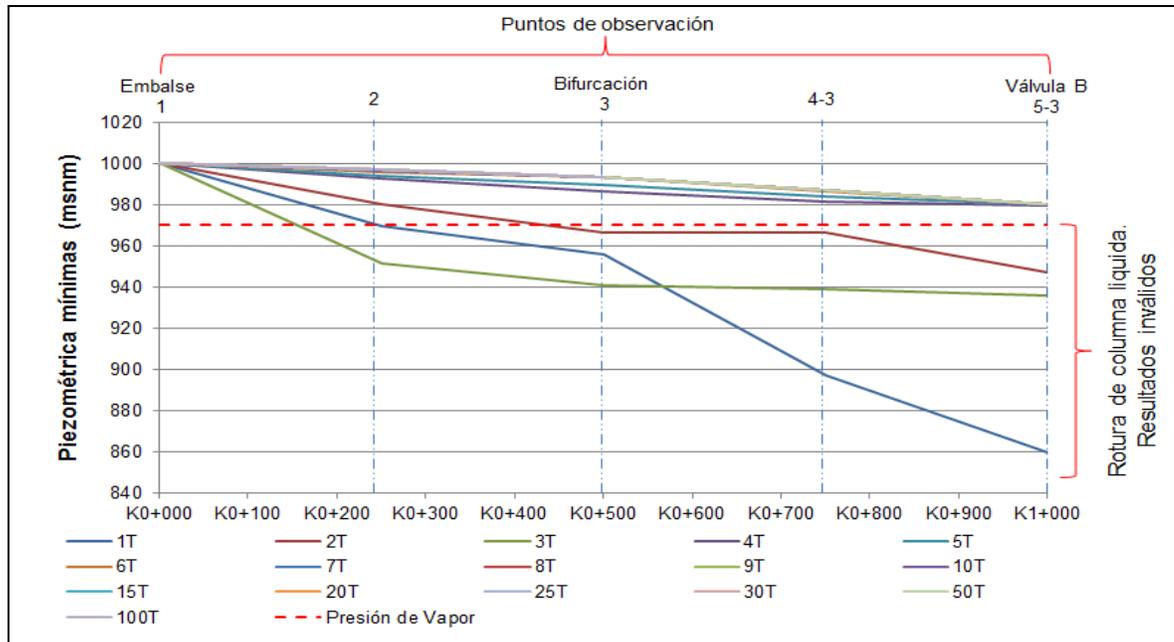
Figura 10.20 Envoltorios de piezométricas mínimas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



Además, se puede apreciar que el cierre desfasado genera una inestabilidad del comportamiento de la piezométrica mínima, originada en la superposición de los efectos, a tal punto que para cierres cortos, las presiones en los ramales aguas abajo de la bifurcación pueden ser más críticas para tiempos un T mayor, como muestra para las maniobras de 1T y 2T en la Figura 10.20 y 2T y 3T en la Figura 10.21.

De igual forma, al comparar el comportamiento entre los dos ramales, en la operación de cierre desfasada, se identificó que el rango de tiempos entre el que producen el mínimo general y los que evitan la presión de vapor, son más críticos en la tubería en la que se realiza primero el cierre (No 2), dado que se obtiene presiones más grandes en el esquema analizado.

Figura 10.21 Envolventes de piezométricas mínimas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



En tercer lugar, al verificar las envolventes de piezométricas máximas para diferentes tiempos de cierre (véase Figura 10.22 y Figura 10.23), se aprecia que se obtienen valores mayores a los observados en el cierre simultáneo, con maniobras muy rápidas: en el caso de la tubería 2 el tiempo de crítico fue de un 1T, mientras que para la No 3 se obtuvo con 2T, en el esquema analizado. En los demás tiempos de cierre evaluados las alturas piezométricas máximas son del mismo son menores a las presentadas en el cierre simultáneo, con válvulas de mariposa.

De forma análoga con las piezométrica mínimas, se apreció que el cierre desfasado genera una inestabilidad del comportamiento de la piezométrica máxima, originada en la superposición de los efectos. La singularidad hace que un tiempo de cierre cualquiera no genere presiones máximas mayores que una maniobra más lenta, como es el caso de 1T y 3T en la Figura 10.23.

Figura 10.22 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.

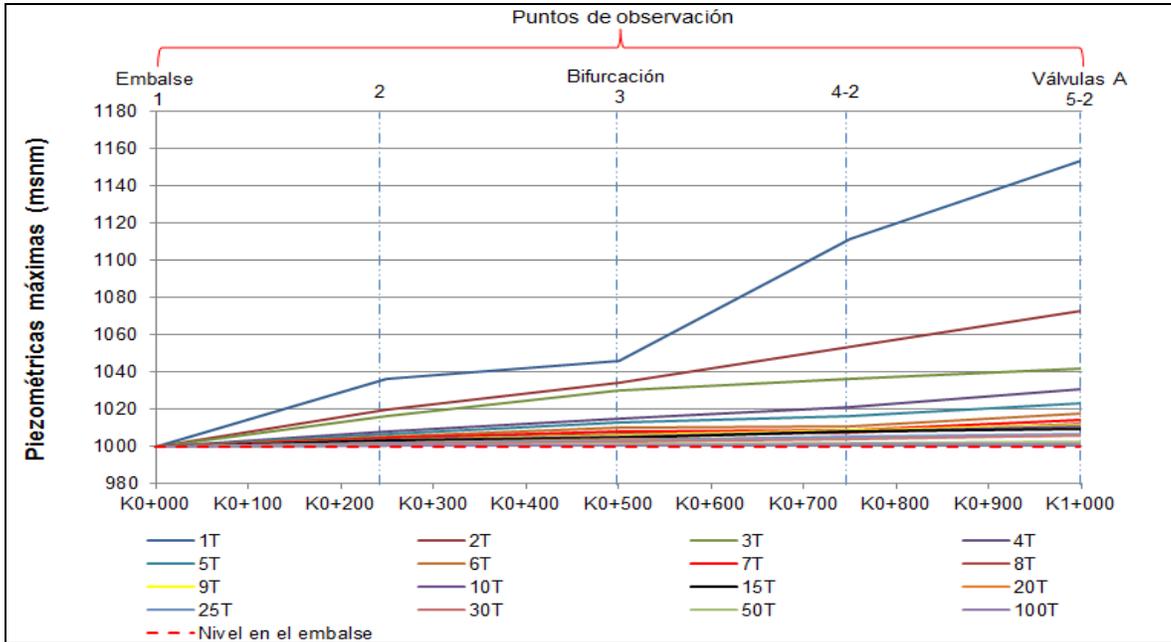
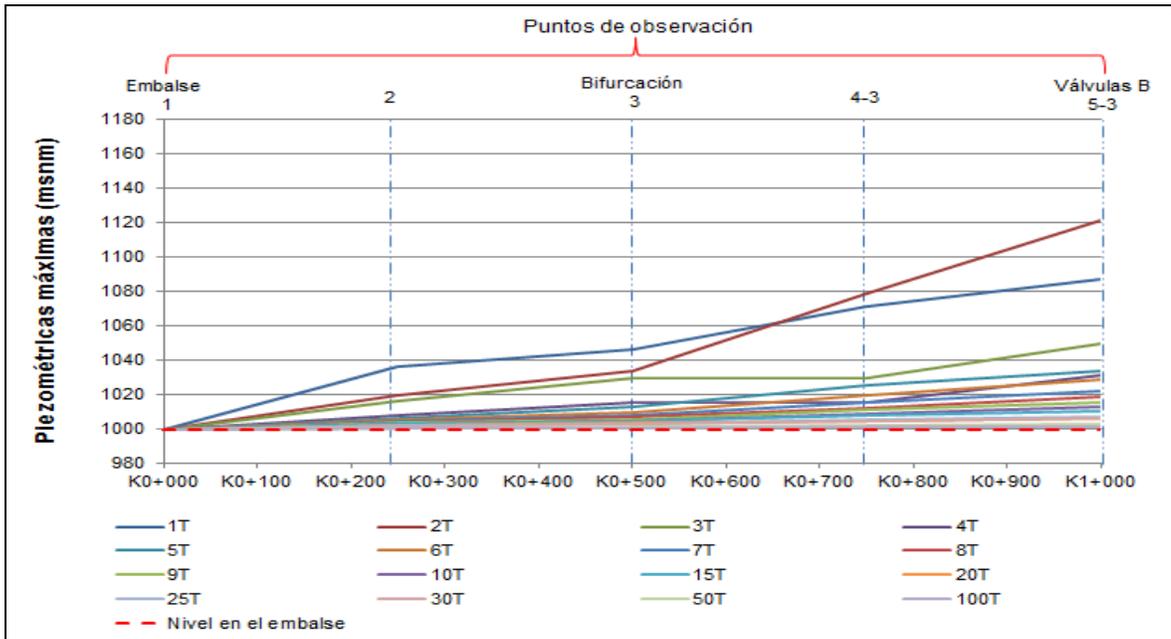


Figura 10.23 Envoltentes de piezométricas máximas por la tubería No 3 para cierres desfasados. Válvulas de mariposa en los extremos de las tuberías. Tiempos de cierre entre T y 100T.



Finalmente, al analizar las envolventes de alturas piezométricas en los diferentes puntos de medición se observa que existe un punto a partir del cual los cambios de presiones positivas o negativas no son significativas (véase Figura 10.24 y Figura 10.25) y no representan peligro para la estabilidad de la tubería. Dicho punto se puede determinar a partir de una gráfica de altura piezométrica vs tiempo de cierre, a partir de los máximos y mínimos de altura piezométrica registrados en las diferentes simulaciones, en cada punto de observación, como el instante en el cual la pendiente de la curva que describe el comportamiento de cada punto de observación está próxima a cero. Siendo el punto más crítico el más cercano al obturador en el caso de las sobrepresiones y el más alejado para las subpresiones.

En el caso del sistema de distribución analizado, el tiempo recomendado para un cierre desfasado sería 30 s (6T), aproximadamente.

Al igual que con las válvulas de compuerta, al realizar el cierre con el tiempo estimado con la anterior metodología, se garantiza una transición suave de las condiciones de flujo permanente a las condiciones hidrostáticas, sin verse afectados por las inestabilidades originadas en el desfase de tiempos de cierre muy pequeños (véase Figura 10.24 y Figura 10.25).

Figura 10.24 Envolventes de alturas piezométricas por la tubería No 2 para cierres desfasados. Válvulas de compuerta en los extremos de las tuberías. Puntos de medición entre el tanque y las válvulas.

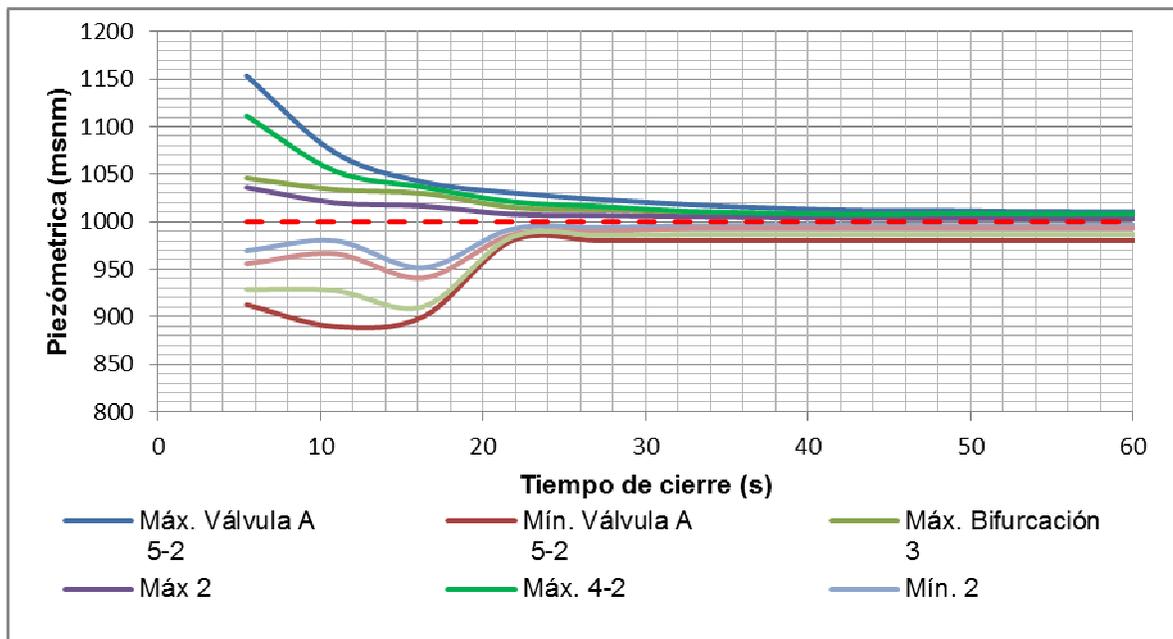
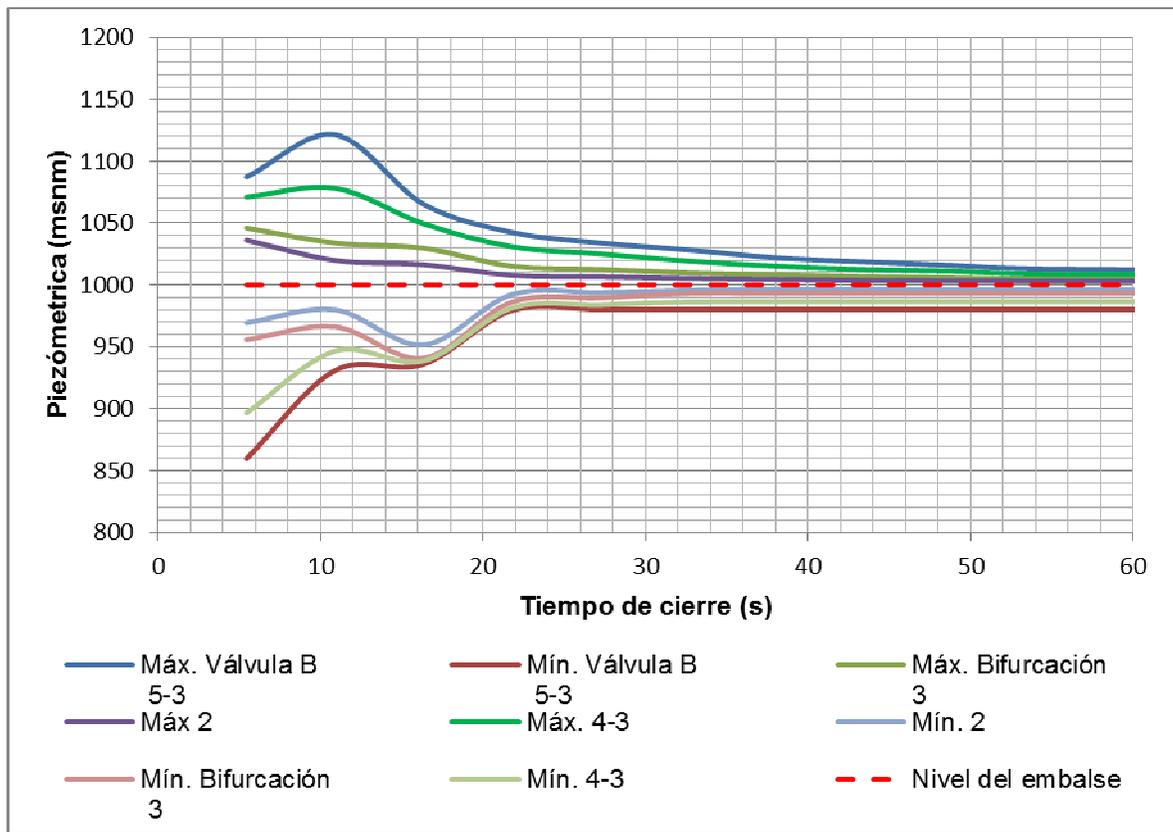


Figura 10.25 Envolvente de alturas piezométricas en diferentes puntos de medición de la tubería No 3, para cierre desfasado con válvulas de mariposa



10.5 COMPARACIÓN GENERAL ENTRE LOS TIPOS DE VÁLVULAS

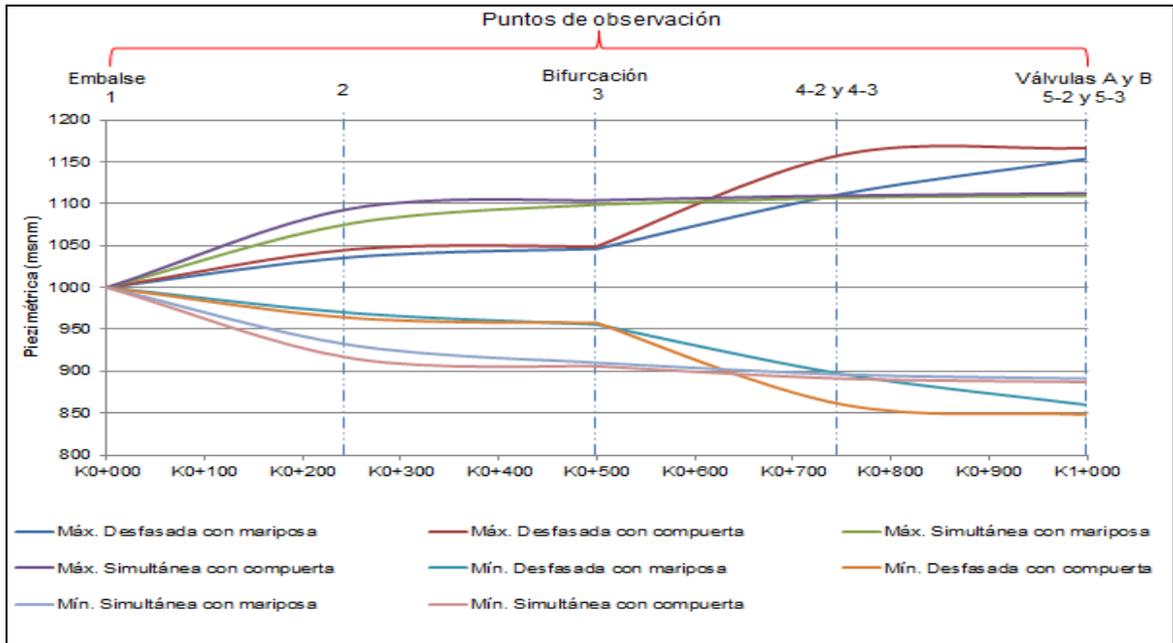
Adicionalmente se realizó una comparación de los valores máximos y mínimos en las dos maniobras de cierre evaluadas, con las dos clases de válvulas utilizadas (véase Figura 10.26), para identificar el comportamiento del sistema, en cada caso, ante un evento crítico. Se confirmó que el comportamiento del sistema ante un cierre simultáneo súbito (tiempo próximos al periodo del sistema) es similar para los dos tipos de válvulas analizadas. Los valores máximos y mínimos estimados para los ramales aguas abajo de la bifurcación son muy parecidos en ambos casos, mientras que en la tubería principal se presenta diferencias de hasta 17 mca.

En el caso de la maniobra de cierre desfasada, el comportamiento es parecido. Sin embargo, el tramo que tiene presiones similares es la tubería principal,

mientras que en los ductos 2 y 3 presentan diferencias de hasta 46 mca, debido al uso de una válvula de compuerta o mariposa.

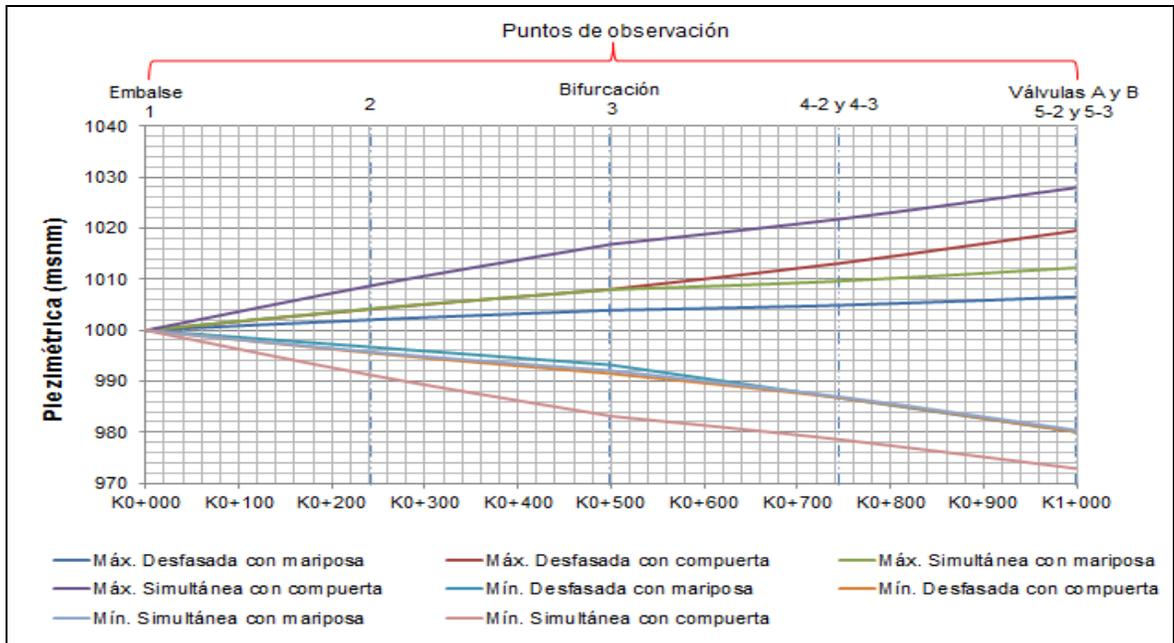
En general, los valores máximos y mínimos del sistema, en las dos maniobras de cierre, son aproximadamente los mismos, lo que indica que para cierre súbitos el valor máximo de la sobre presión no depende del tipo válvula.

Figura 10.26 Piezométricas máximas y mínimas encontrados para las diferentes maniobras de cierre evaluadas. Tiempo de cierre Instantáneo (1T).



En la Figura 10.27 se presenta las piezometricas máximas y mínimas para la diferentes maniobras evaluadas y un tiempo de cierre de 108,8 s (este tiempo de operación se puede considerar como largo). Se puede apreciar que para el mismo tiempo de cierre, mayor al instantáneo, se obtienen menores sobrepresiones con una válvula de mariposa que con una de compuerta. Es decir, el tiempo necesario, cuando se utiliza una válvula de mariposa, para realizar una transición suave desde las condiciones de flujo permanente a las condiciones hidrostáticas y obtener sobrepresiones similares, es menor que el solicitado por una válvula de compuerta.

Figura 10.27 Piezométricas máximas y mínimas encontrados para las diferentes maniobras de cierre evaluadas. Tiempo de cierre largos.



11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- I. Se verificó que maniobras muy rápidas (cierre instantáneo) de operación simultánea no solo generan sobrepresiones altas en el sitio del obturador, sino que además, la onda de sobrepresión en la tubería se traslada al resto del sistema sin una reducción importante de su valor pico. Esto permite concluir, que para tiempos de cierre muy pequeños las fuerzas de fricción no logran disipar el efecto de la sobrepresión, en el esquema analizado. Es decir, que para maniobras con t aproximadamente cero, el esquema analizado podría presentar la misma presión máxima en todos los puntos del sistema de distribución.

Por el contrario, las maniobras de cierre desfasado con tiempo de operación instantáneos, presentan una notable diferencia entre las sobrepresiones máximas en la tuberías aguas abajo de la bifurcación y la tubería principal, siendo más críticos los puntos próximos al obturador. Esto se debe principalmente a que la piezométrica en la bifurcación oscila entre los mismos valores, lo que sugiere que gracias a la superposición de las ondas, este punto del sistema conserva la energía suministrada por la señal emitida en el primer cierre durante periodo prolongado de tiempo, a diferencia de los puntos de la descarga en los cuales la energía se reduce notablemente con el transcurrir de los segundos

- II. Se encontró que, para los dos tipos de cierre y las dos clases de válvulas evaluadas, se puede identificar un tiempo de cierre a partir del cual los cambios de presiones positivas o negativas no son significativos y no representan peligro para la estabilidad de la tubería. Al realizar la maniobra con este tiempo, se garantiza una transición suave desde las condiciones de flujo permanente a las condiciones hidrostáticas, con incrementos muy pequeños muy pequeños por encima de la altura hidrostática.

Para determinar el tiempo mencionado anteriormente se recomienda, tal como se realizó para las diferentes maniobras evaluadas en el presente documento, construir una gráfica de altura piezométrica vs tiempo de cierre, a partir de los de los máximos y mínimos de altura piezométrica registrados en las diferentes simulaciones, en cada punto de observación. El instante en el cual la pendiente de todas las curvas que describe el comportamiento de cada punto de observación esté próxima a cero, corresponderá al tiempo indicado para realizar la maniobra de cierre.

- III. Los valores máximos y mínimos de altura piezométrica del sistema analizado, producidos por maniobras de cierres súbitas, simultáneas o

desfasadas, no depende en principio del tipo válvula ya que los valores obtenidos son aproximadamente los mismos. De acuerdo con el análisis en sistema similares al analizado, en donde se requiera efectuar cierres, simultáneos o desfasados, lo más rápido posible se recomienda utilizar válvulas de mariposa, ya que el tiempo necesario para realizar una transición suave desde las condiciones de flujo permanente a las condiciones hidrostáticas y obtener sobrepresiones similares, es menor que el solicitado por una válvula de compuerta.

- IV. Para cierres súbitos cuando la operación de cierre se realiza desfasada, la sobrepresión es máxima y la depresión es mínima, debido a la superposición de las ondas originadas en el cierre de cada válvula. No obstante, si la maniobra se realiza más lentamente, las sobrepresiones se maximizan y subpresiones se minimizan, si el cierre es simultáneo. Considerando que las maniobras se realicen con un tiempo estimado con la metodología indicada en el acápite I o si la maniobra de cierre es relativamente paulatina, se recomienda realizar las operaciones de cierre desfasadas para reducir la posibilidad de que se presente los valores pico y valle de presión en el sistema.
- V. El sistema de distribución analizado presenta mayor sensibilidad al tipo de maniobra realizada, simultánea o desfasada, ya que sin importar el tipo de válvula y para los mismos tiempos de cierre, se logran valores más críticos de presión. En segundo lugar el tiempo de cierre, considerando que entre más corto este más intenso es el fenómeno. Por último se encuentra el tipo de válvula ya que los resultados encontrados para las dos clases evaluadas los resultados son cercanos, cuando el tiempo de cierre es corto.
- VI. La metodología desarrollada en el presente documento, permite continuar con los estudios de sensibilidad de redes abiertas, con el fin de encontrar recomendaciones con mayor generalidad y aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

1. *A Review of Water Hammer Theory and Practice*. **GUIDAOUI, Mohamed, y otros. 2005.** 1, s.l. : ASME Digital Collection, Enero de 2005, Applied Mechanics Reviews, Vol. 58.
2. **CHAUDRY, M. Hanif. 1979.** *Applied Hydraulic Transients*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1979. ISBN:0-442-21517-7.
3. **LAROCK, Bruce, JEPSON, Roland y WATTERS, Gary. 2000.** *Hydraulics of Pipelines Systems*. United States of America : CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-1806-8.
4. **MARTIN, Samuel. 1999.** Hydraulic Tansient Desing for Pipeline Systems. [aut. libro] Larry MAYS. *Hydraulic Design Handbook*. United States of America : McGraw Hill, 1999, 12.
5. *Maximum Water Hammer Sensitivity Analysis*. **EMADI, Jalil y SOLEMANI, Abbas. 2011.** 2011, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 49.
6. **PÉREZ FARRÁZ, Luis E. y GUITELMAN, Adolfo.** Facultad de ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. [En línea] 22/08/2005. [Citado el: 01 de 08 de 2013.] <http://escuelas.fi.uba.ar/iis/GOLPE%20DE%20ARIETE.pdf>.
7. *Sheets 3-30-1 and 330-1/1* . **UNITED STATES ARMY CORPS ENGINEERS. 1987.** 1987, Hydraulic Design Criteria.
8. *SHEETS 331-1 to 331-3*. **UNITES STATES CORPS OF ENGINEERS. 1987.** 1987, Hydraulic Design Criteria.
9. **STREETER, Victor y WYLIE, Benjamin. 1988.** *Mécanica de los Fluidos*. Ciudad de Mexico : MCGraw Hill, 1988. ISBN 968-451-841-2.
10. **TULLIS, Paul. 1989.** *Hydraulics of pipelines: Pumps, valves, cavitation, transients*. United States of America : John Wiley & Sons, 1989. ISBN 0-471-833285-5.
11. *Water Hammer Model Sensitivity study by the Fast Model*. **KALIATKA, Algirdas, KOPUSTINSKAS, Vytis y VAISNORAS, Mindaugas. 2009.** 1, Kaunas, Lithuania : Lithuanian Academy of Sciences Publishers, 2009, Energetika, Vol. 55.

ANEXOS

(Archivos adjuntos en versión digital, debido al tamaño de los mismos.
Extensiones .xls y imp)