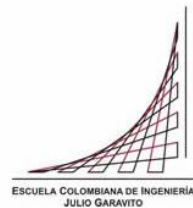


Maestría en Ingeniería Civil

Estudio de sensibilidad de fenómenos transitorios en sistemas de redes abiertas por operación de dispositivos de control

Erik Harryson Gelvez Ojeda

Bogotá, D.C., 21 de Julio de 2015



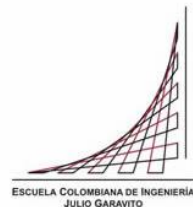
**Estudio de sensibilidad de fenómenos transitorios en sistemas de
redes abiertas por operación de dispositivos de control**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Director

Bogotá, D.C., 21 de Julio de 2015



La tesis de maestría titulada “Estudio de sensibilidad de fenómenos transitorios en sistemas de redes abiertas por operación de dispositivos de control”, presentada por Erik Harryson Gelvez Ojeda, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 21 de julio de 2015

A mi esposa y mis padres, quienes con su cariño y apoyo incondicional me motivaron para conseguir esta meta académica tan importante.

Agradecimientos

A Applied Flow Technology y a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, quienes formaron un convenio que permitió el desarrollo del presente trabajo de grado.

Resumen

En este documento se presenta un análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) durante el flujo transitorio en una red abierta a presión. El estudio consistió en comparar el comportamiento de estas variables adoptando diferentes velocidades de flujo, rapidez de la maniobra, tipos de válvulas, tipologías, diámetros y longitudes de tuberías en redes con tuberías de PVC. Como resultado principal del análisis se recomienda adoptar tiempos de cierre mayores o iguales a 75T (150 L/a), en redes con tuberías de PVC, para garantizar que la máxima presión dinámica no sea mayor al 20% de la presión estática ni la mínima presión dinámica sea menor que la presión atmosférica.

Para la simulación de este fenómeno se utilizó el software AFT Impulse® y como origen del transitorio el cierre de válvulas.

Índice general

Página

Introducción	18
Capítulo 1. Formulación del problema	19
Capítulo 2. Objetivos	21
2.1. General	21
2.2. Específicos	21
Capítulo 3. Esquema metodológico	22
Capítulo 4. Marco teórico	23
4.1. Flujo transitorio	23
4.1.1. Ecuaciones que explican el fenómeno	26
4.1.2. Celeridad de la onda	29
4.1.3. Periodo de la tubería y tiempo de maniobra	29
4.1.4. Separación de columna	30
4.1.5. Método de las características	30
4.2. Dispositivos de control	35
4.2.1. Válvulas de cierre	35
4.3. Estudios específicos de sensibilidad en un sistema a presión	40
4.3.1. Tiempo de maniobra (t)	41
4.3.2. Fricción (f)	41
4.3.3. Longitud de la tubería (L)	42
4.3.4. Número de segmentos (N)	43
4.3.5. Pendiente de la tubería	43
4.3.6. Válvulas	44
4.3.7. En una red con bombeo	44
Capítulo 5. Modelo comercial para el cálculo de transitorios. Aft impulse®	47
Capítulo 6. Selección de las variables que se deben utilizar para el análisis de sensibilidad	52

6.1. Tiempos de maniobra.....	53
6.2. Velocidades en flujo permanente.....	55
6.3. Diámetros y longitudes	56
6.4. Material de las tuberías	57
6.5. Topología del sistema de distribución analizado.....	57
6.6. Tipo de válvula	59
6.7. Punto de evaluación	59
6.8. Esquema de la simulación propuesta	62
6.9. Presentación de resultados	62
Capítulo 7. Análisis de resultados.....	66
7.1. Bifurcación y válvula de compuerta	66
7.1.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de maniobra.	66
7.1.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.	75
7.1.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro de la tubería.	78
7.1.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D.....	80
7.1.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$).....	83
7.2. BIFURCACIÓN Y VÁLVULA DE MARIPOSA	85
7.2.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de maniobra.	86

7.2.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.	89
7.2.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro..	91
7.2.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D.....	94
7.2.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$).....	95
7.3. TRIFURCACIÓN	97
7.3.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de cierre.	97
7.3.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.	99
7.3.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro.	101
7.3.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D.....	103
7.3.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$).....	105
Capítulo 8. Conclusiones	107
Capítulo 9. Recomendaciones	111
Bibliografía.....	112

Índice de tablas

Página

Tabla 6.1 Tiempos de maniobras evaluados.....	54
Tabla 6.2 Rango de velocidades medias de flujo analizadas	55
Tabla 6.3 Diámetros utilizados para la simulación	56
Tabla 6.4 Relación longitud-diámetro (L/D) de la tubería	56
Tabla 6.5 Combinaciones de topologías y geometrías analizadas	58
Tabla 6.6 Fuentes de transitorio analizadas.....	59
Tabla 6.7 Resumen de variables utilizadas en el análisis de sensibilidad	62
Tabla 7.1 Tiempos de maniobra a partir del cual la presión mínima dinámica es constante.....	73
Tabla 7.2 Tiempos de maniobra hasta los cuales se presenta separación de columna.....	73
Tabla 7.3 Tiempos de cierre que se deben emplear para el estudio de sensibilidad a la presión relativa, modificando otras variables.....	75
Tabla 7.4 Rangos de la diferencia de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ para válvulas de mariposa, respecto de válvulas de compuerta	91

Índice de figuras

Página

Figura 1.1 Fenómeno del golpe de ariete debido al cierre de una válvula.....	19
Figura 4.1 Interpretación física del flujo transitorio debido a un cierre instantáneo..	24
Figura 4.2 Variación de la presión en la válvula sin efecto de la fricción	26
Figura 4.3 Variación de la presión en la válvula con efecto de la fricción.....	26
Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre para el planteamiento de la ecuación de movimiento	27
Figura 4.5 Volumen de control utilizado para deducir la ecuación de continuidad...	28
Figura 4.6 Separación de columna aguas abajo de una válvula, luego de un cierre súbito.....	30
Figura 4.7 Malla rectangular para la solución por el método de las características .	31
Figura 4.8 Topología típica de una bifurcación	33
Figura 4.9 Esquema de las características en la bifurcación.....	34
Figura 4.10 Tipos de válvulas	36
Figura 4.11 Variación de la relación de área para diferentes tipos de válvulas	37
Figura 4.12 Variación típica de los coeficientes de pérdidas para diferentes tipos de válvulas	39
Figura 4.13 Diferentes leyes de cierre	40
Figura 4.14 Esquema del sistema de distribución analizado.....	40
Figura 4.15 Comparación de la disipación de energía a partir de un modelo experimental y la calculada por el método de las características	42
Figura 4.16 Esquema analizado por Emadi y Solemani.....	45
Figura 4.17 Red analizada por Kaliatka, Kopustinskas y Vaišnoras	46
Figura 5.1 Espacio de trabajo en AFT Impulse®.....	47
Figura 5.2 Ventana de Steady Solution Control	48
Figura 5.3 Definición de las propiedades del sistema	48
Figura 5.4 Definición de las características de una tubería	49
Figura 5.5 Ejemplo de la inducción de transitorio en una red de tubería	49
Figura 5.6 Definición del Δx y el Δt	50
Figura 5.7 Definición de la solución del transitorio	50

Figura 5.8 Opciones de visualización de los resultados	51
Figura 6.1 Red de prueba para definición de tiempos de simulación	53
Figura 6.2 Reducción típica de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática, con el aumento del tiempo de la maniobra.....	54
Figura 6.3 Topología 1. Bifurcación	57
Figura 6.4 Topología 2. Trifurcación	58
Figura 6.5 Envolvente de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$	60
Figura 6.6 Envolvente de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 800$	60
Figura 6.7 Envolvente de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$	61
Figura 6.8 Envolvente de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 800$	61
Figura 6.9 Presión dinámica vs. variable empleada en el análisis.....	63
Figura 6.10 Pendiente promedio vs. variable empleada en el análisis	64
Figura 6.11 Relación presión dinámica máxima - presión estática vs. variable empleada en el análisis	64
Figura 6.12 Relación presión dinámica mínima - presión atmosférica vs. variable empleada en el análisis.	65
Figura 7.1 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$. Diámetros de 3, 4 y 6"	67
Figura 7.2 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6"	67
Figura 7.3 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $D = 3$ ". $V = 1$ m/s.....	68
Figura 7.4 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $D = 4$ ". $V = 4$ m/s.....	69
Figura 7.5 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $D = 6$ ". $V = 6$ m/s.....	69
Figura 7.6 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$. Diámetros de 3, 4 y 6"	70

Figura 7.7 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6"	70
Figura 7.8 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $D = 3$ ". $V = 1$ m/s.....	72
Figura 7.9 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $D = 4$ ". $V = 4$ m/s.....	72
Figura 7.10 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $D = 6$ ". $V = 6$ m/s.....	73
Figura 7.11 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvula de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 100$. Diámetros de 3, 4 y 6". $t < 75T$	74
Figura 7.12 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6". $t < 75T$	74
Figura 7.13 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $L/D = 400$. $D = 3$ "	76
Figura 7.14 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $L/D = 1500$. Diámetros de 6"	76
Figura 7.15 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $L/D = 400$. $D = 3$ "	77
Figura 7.16 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $L/D = 1500$. $D = 6$ "	77
Figura 7.17 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $L/D = 400$. $V = 2$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T ..	79
Figura 7.18 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $L/D = 1500$. $V = 4$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	79
Figura 7.19 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $L/D = 400$. $V = 2$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T ..	80
Figura 7.20 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $L/D = 2500$. $V = 4$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	80
Figura 7.21 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $D = 6$ ". $V = 2$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	81
Figura 7.22 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $D = 20$ ". $V = 4$ m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	81

Figura 7.23 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 6". V = 2 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	82
Figura 7.24 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 20". V = 4 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T	83
Figura 7.25 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. V = 2 m/s. L/D = 2500 en la principal. D= 6"	84
Figura 7.26 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. V = 4 m/s. L/D = 400 en la principal. D=20"	84
Figura 7.27 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. V = 2 m/s. L/D = 2500 en la principal. D= 6"	85
Figura 7.28 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. V = 4 m/s. L/D = 400 en la principal. D= 20"	85
Figura 7.29 Variación de la relación presión dinámica máxima - hidrostática. V = 4 m/s. L/D = 800. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	87
Figura 7.30 Variación de la relación presión dinámica máxima - hidrostática. V = 2 m/s. L/D = 2500. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	88
Figura 7.31 Variación de la relación presión dinámica mínima - hidrostática. V = 4 m/s. L/D = 800. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	88
Figura 7.32 Variación de la relación presión dinámica mínima - hidrostática. V = 2 m/s. L/D = 2500. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	88
Figura 7.33 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. D = 6" L/D = 800. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	90
Figura 7.34 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. D = 20" L/D = 2500. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$	90
Figura 7.35 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. D = 6" L/D = 800. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$	90
Figura 7.36 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. D = 20" L/D = 2500. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$	91
Figura 7.37 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 4 m/s. L/D = 800. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	92
Figura 7.38 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 2 m/s. L/D = 25000. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	93

Figura 7.39 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 4 m/s. L/D = 800. $L_1/D_1 = 1 L_2/D_2$	93
Figura 7.40 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Cierre simultáneo. V = 2 m/s. L/D = 25000. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	93
Figura 7.41 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 2 m/s. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	94
Figura 7.42 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 4 m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	95
Figura 7.43 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 2 m/s. L/D = 800. $t = 1T$	96
Figura 7.44 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 3 m/s. L/D = 2500. $t = 25T$	96
Figura 7.45 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 2 m/s. L/D = 800. $t = 1T$	96
Figura 7.46 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 3 m/s. L/D = 2500. $t = 75T$	97
Figura 7.47 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 4 m/s. L/D = 800. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de compuerta. $L_1/D_1 = L_2/D_2$	98
Figura 7.48 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. V = 2 m/s. L/D = 2500. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de mariposa. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$	98
Figura 7.49 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 4 m/s. L/D = 800. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de compuerta. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. 99	99
Figura 7.50 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. V = 2 m/s. L/D = 2500. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de mariposa. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$ 99	99
Figura 7.51 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. L/D = 800. V = 2 m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$	100
Figura 7.52 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvula de mariposa. $t = 25T$. L/D = 2500. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$	100
Figura 7.53 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvula de compuerta. L/D =800. V = 2 m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$	101
Figura 7.54 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvula de mariposa. $t = 25T$. L/D = 2500. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$	101

Figura 7.55 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 4$ m/s. $L/D = 800$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. Válvula de compuerta.....	102
Figura 7.56 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s. $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa	102
Figura 7.57 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 4$ m/s. $L/D = 800$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. Válvula de compuerta.....	103
Figura 7.58 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 2$ m/s. $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa	103
Figura 7.59 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. $D = 20''$	104
Figura 7.60 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 2$ m/s. $t = 25T$. $D=20''$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa	104
Figura 7.61 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s. $L/D = 800$. $D=20''$	105
Figura 7.62 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 3$ m/s. $L/D = 2500$. $D=20''$	106

Índice de anexos

Anexo A Resumen de resultados.....	114
------------------------------------	-----

Introducción

El flujo transitorio se caracteriza por la modificación de la presión, el caudal y la velocidad del fluido en el tiempo. Los cambios lentos de velocidad y caudal no producen alteraciones en la presión; sin embargo, la modificación rápida de éstos produce grandes variaciones (positivas y negativas) en las tuberías.

En este documento se presenta un análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) durante el flujo transitorio en una red abierta a presión. El estudio consistió en comparar el comportamiento de estas variables adoptando diferentes velocidades de flujo, rapidez de la maniobra, tipos de válvulas, tipologías, diámetros y longitud de tuberías. Para la simulación de este fenómeno se utilizó el software AFT Impulse[®] y como origen del transitorio el cierre de válvulas.

Inicialmente se formula el problema que se pretende resolver, se fijan los objetivos y se explica la metodología empleada.

Posteriormente, se realiza una revisión teórica del concepto de flujo transitorio, se revisan las ecuaciones que explican el fenómeno, el método numérico del software empleado para las modelaciones y algunos conceptos asociados al flujo transitorio. Además, se estudian varias publicaciones sobre el análisis de sensibilidad a la presión.

Adicionalmente, se presenta un tutorial rápido sobre el manejo del software AFT Impulse[®], que permite comprender el comportamiento y el uso del programa. Se seleccionan las variables utilizadas en el análisis de sensibilidad a la presión, con base en la revisión bibliográfica y algunos análisis cualitativos y cuantitativos del problema.

Por último, se evalúan los resultados obtenidos con las diferentes variables utilizadas y se formulan las conclusiones y recomendaciones.

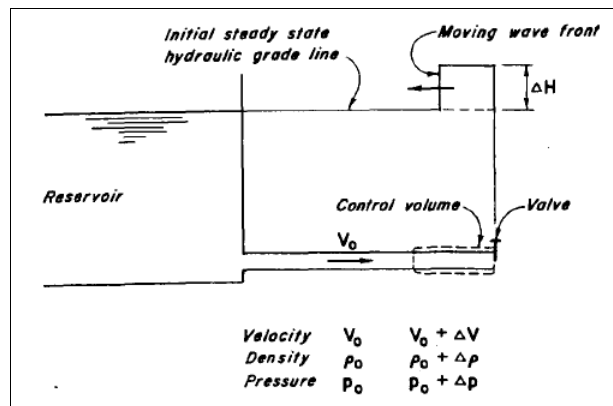
Capítulo 1

Formulación del problema

El cierre de válvulas, el arranque o la parada de máquinas hidráulicas producen flujo transitorio en los sistemas de tuberías a presión. La manipulación de estos elementos hace que la energía cinética del fluido en estado permanente se convierta en energía potencial en un periodo de tiempo muy corto, presentando cambios de presión.

Cuando el flujo transitorio produce sobrepresiones muy altas se denomina golpe de ariete y, por lo general, se presenta por la operación inadecuada de un dispositivo. Durante este fenómeno la presión aumenta en un valor ΔH , el diámetro se expande un valor ΔD , el líquido se comprime a un valor $\rho + \Delta\rho$ y una onda de presión positiva se desplaza en dirección aguas arriba, como se muestra en la figura 1.1. Este fenómeno es oscilatorio y produce que estas condiciones se inviertan y alternen hasta cuando se disipa totalmente.

Figura 1.1 Fenómeno del golpe de ariete debido al cierre de una válvula



Fuente: Chaudry, *Applied Hydraulic Transients*, p. 8.

La importancia del estudio de los transitorios se fundamenta en la necesidad de establecer el valor de las sobrepresiones y depresiones que se presentan, con el fin de proponer mecanismos que permitan evitar la rotura de los ductos y la pérdida económica para el operador de la red.

Para minimizar el efecto del golpe de ariete se utilizan métodos formulados para tuberías y redes sencillas, que proveen valores aproximados; sin embargo, éstos omiten variables que pueden llegar a aumentar la sobrepresión por encima de los valores esperados. Con el avance de los modelos computacionales, hoy es posible simular este fenómeno en sistemas de tuberías y evaluar las condiciones extremas a las cuales podrían estar sometidos. Por esta razón, se debe realizar una revisión detallada y simular los fenómenos transitorios para plantear recomendaciones dirigidas a la correcta operación de los sistemas de distribución en redes abiertas.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. General

Realizar un análisis de sensibilidad del fenómeno del golpe de ariete para diferentes topologías de redes abiertas, a partir de las condiciones de operación de válvulas, utilizando el software AFT Impulse[®] para desarrollar las diferentes simulaciones.

2.2. Específicos

- Estudiar y conocer el programa AFT Impulse[®].
- Realizar un estudio que permita seleccionar diferentes elementos de control y operación de redes, determinando las condiciones de operación de cada dispositivo.
- Establecer esquemas de topologías de redes para su simulación.
- Definir qué tipos de elementos de los que se utilizan para la simulación son más adecuados para los sistemas de distribución en las redes abiertas analizadas, de acuerdo con sus características de operación.
- Identificar patrones de comportamiento de las sobrepresiones, respecto de la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), para cada una de las variables y topologías utilizadas para el análisis.
- Establecer para cuál de las variables analizadas las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\grave{i}n}/P_{atm}$) es más sensible.
- Plantear recomendaciones para la operación de los dispositivos de control en sistemas de redes abiertas, que permitan reducir las sobrepresiones originadas por su accionamiento a un valor que no ponga en riesgo la estabilidad de las tuberías.

Capítulo 3

Esquema metodológico

Para la consecución de los objetivos fijados se utilizó el siguiente esquema metodológico:

- I. Inicialmente se hizo una revisión bibliográfica sobre los siguientes temas: flujo transitorio en sistema de tuberías a presión, dispositivos de control y operación de redes.
- II. Se definieron las variables a partir de las cuales se debía realizar el análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$). Se identificaron, preliminarmente, las variables con un mayor peso en el cálculo del transitorio, de acuerdo con las recomendaciones de los autores consultados. Posteriormente, se realizaron modelaciones de prueba que permitieron precisar y definir el número que se debía utilizar.
- III. Se estableció la maniobra que se debía realizar como elemento activador del flujo transitorio en las topologías escogidas.
- IV. Se especificaron las topologías básicas para el análisis de sensibilidad.
- V. Se montaron las topologías en el programa AFT Impulse[®], simulando cierres y modificando las variables seleccionadas para el análisis.
- VI. Se organizaron los resultados obtenidos de cada simulación y se elaboraron gráficas que permitieron identificar patrones de comportamiento de las sobrepresiones para cada una de las variables y topologías empleadas.
- VII. Se analizaron los resultados obtenidos.
- VIII. A partir del análisis de los resultados, se formularon recomendaciones para la operación de redes abiertas de distribución a presión.

Capítulo 4

Marco teórico

A continuación se presenta la revisión bibliográfica que se hizo para comprender, de forma adecuada, el fenómeno de estudio y, al mismo tiempo, acotar los elementos que se deben tener en cuenta para la elaboración del estudio de sensibilidad. Con este fin se revisaron principalmente tres aspectos: la teoría clásica de flujo transitorio en tuberías a presión, la teoría de dispositivos de control y estudios de sensibilidad hechos a redes de distribución abiertas.

4.1. Flujo transitorio

El flujo transitorio se caracteriza por la modificación de la presión, el caudal y la velocidad del fluido en el tiempo. Existen situaciones que inducen la formación de este tipo de flujo en los sistemas de tuberías. Según Chaudry (1979), las principales causas son la manipulación de las válvulas (apertura, cierre o mal funcionamiento), el inicio o la detención del funcionamiento de las bombas en un sistema de bombeo y la puesta en marcha de una turbina hidráulica (la aceptación o el rechazo de carga).

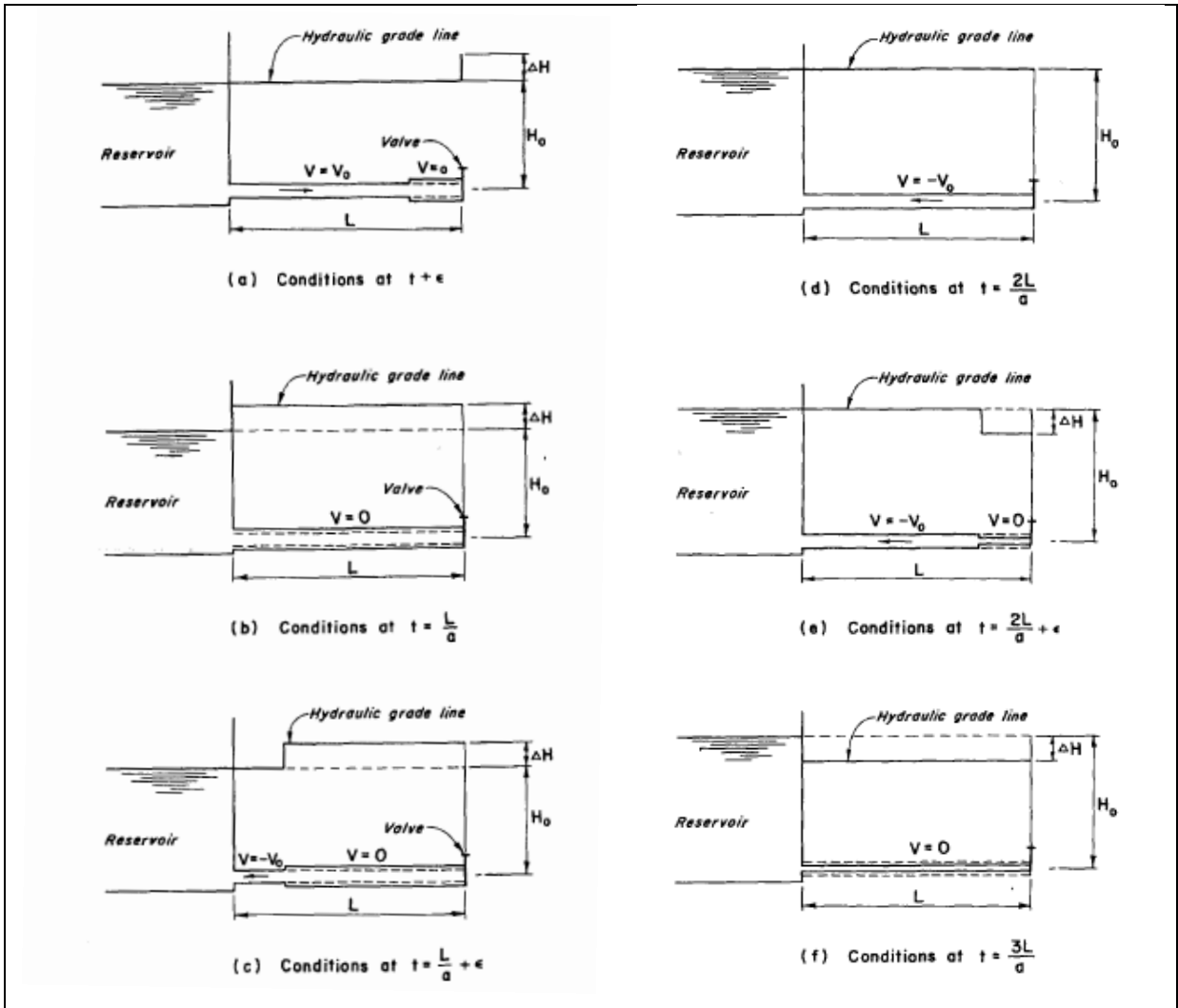
La explicación clásica del fenómeno físico corresponde al cierre de una válvula ubicada al final de una tubería simple. Es necesario aclarar que los flujos transitorios originados por otros agentes tienen un comportamiento oscilatorio similar, por lo cual se considera suficiente describir únicamente el evento de cierre.

En el esquema de la figura 4.1 se muestra el flujo transitorio debido al cierre instantáneo de una válvula al final de una tubería simple, el cual se describe a continuación:

- En el instante cero (t_0), el sistema se encuentra en condiciones de flujo permanente, es decir, el nivel de agua es constante en el depósito (suponiendo un depósito de gran tamaño), la válvula al final de la tubería está abierta y la velocidad de flujo en la tubería es de un valor V_0 .
- Un instante más tarde ($t = t_0 + \epsilon$) la válvula se cierra completamente, por lo cual, la velocidad en las cercanías a ésta pasa de un valor V_0 a 0, la energía cinética se

convierte en energía potencial, aumenta la presión en un valor ΔH , el diámetro se expande un valor ΔD , el líquido se comprime a un valor $\rho + \Delta\rho$ y una onda de presión positiva se desplaza en dirección al depósito con velocidad “a”.

Figura 4.1 Interpretación física del flujo transitorio debido a un cierre instantáneo



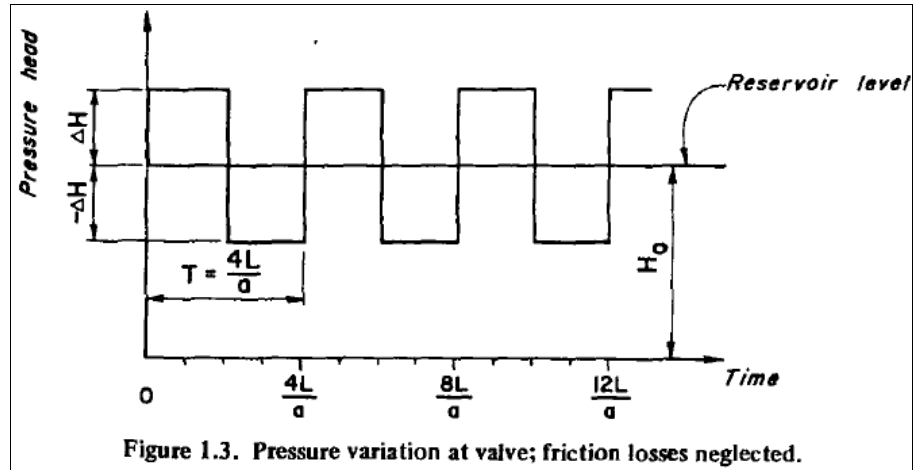
Fuente: Chaudry, *Applied Hydraulic Transients*, pp. 12-13.

- 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 para la sección aguas arriba de la válvula, en el instante $t_0 + \epsilon$.

- 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 convierte la energía potencial en cinética, originando 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 vuelve a las condiciones anteriores al cierre, con la diferencia de 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 que se presentó en los momentos posteriores al cierre. Cerca de la válvula se disminuye la presión en un valor ΔH , el diámetro se comprime un valor ΔD , el líquido se comprime a un valor $\rho + \Delta\rho$ y una onda de presión negativa se desplaza 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 que se presenta entre la presión en la tubería y el nivel del tanque, se inicia nuevamente una onda de descompresión. La diferencia entre ésta y la anterior consiste en que la velocidad del flujo tiene la misma dirección de la onda.
- Luego de un tiempo $t_0 + 4\frac{L}{a}$ la tubería regresa a sus condiciones originales de escurrimiento y finaliza el ciclo de viaje de la onda.

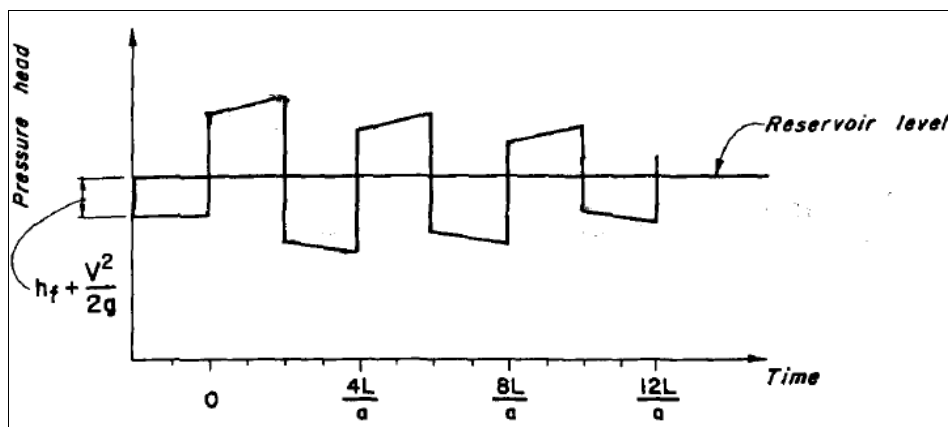
En los instantes posteriores a $t_0 + 4\frac{L}{a}$ se produce la repetición del ciclo de la onda con una atenuación paulatina, hasta lograr una condición de equilibrio. Según Chaudry (1979), el ciclo se extendería indefinidamente si no existiera una fuerza externa que le hiciera resistencia a las fuerzas que producen el fenómeno (figura 4.2). En este caso, la fuerza de fricción es la responsable de disminuir la magnitud de las presiones y velocidades (figura 4.3).

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



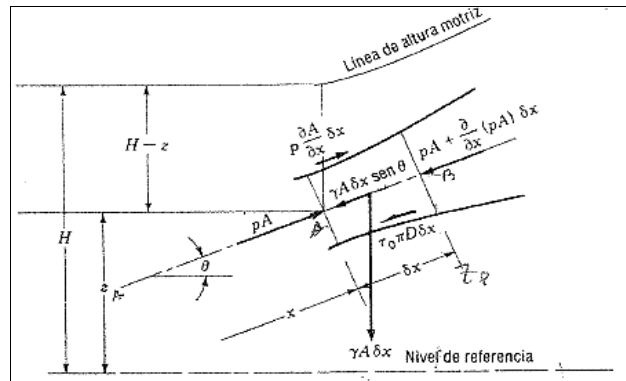
4.1.1. Ecuaciones que explican el fenómeno.

El conjunto de ecuaciones que explican el flujo transitorio son expresiones derivadas de la aplicación de los principios de movimiento y continuidad. Para Streeter y Wylie (1988) la expresión de movimiento aplicada a flujos transitorios en tuberías corresponde a la ecuación 4.1. El diagrama de cuerpo libre para el planteamiento de esta expresión se presenta en la figura 4.4.

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

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:

$\frac{\partial V}{\partial t}$ variación de la velocidad respecto al tiempo.

$\frac{\partial p}{\partial x}$ variación de la presión respecto al espacio.

f factor de fricción de la tubería.

V velocidad de flujo.

D diámetro de la tubería.

G aceleración de la gravedad.

ρ densidad del fluido.

θ ángulo entre el eje de la tubería y la horizontal.

Para hallar 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.

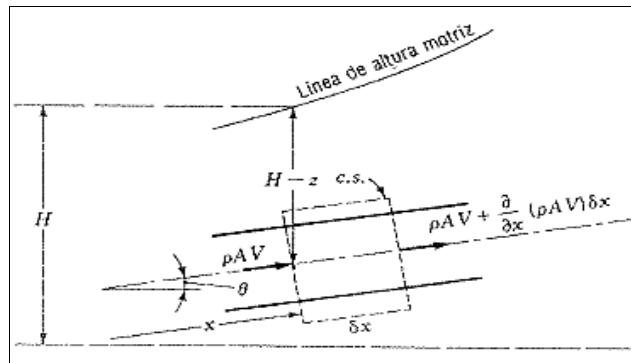
$$\frac{\partial V}{\partial t} \gg \frac{\partial V}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} \approx 0$$

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

De igual forma, el principio de continuidad aplicado al fenómeno del golpe de ariete se puede expresar como se muestra en la ecuación 4.2. El volumen de control que se utilizó para la deducción de la expresión se muestra en la figura 4.5.

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Figura 4.5 Volumen de control utilizado para deducir la ecuación de continuidad



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

Donde:

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

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

a celeridad de la onda, determinada como se muestra en el numeral 4.1.2. .

Para hallar 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 comprensible y la tubería es elástica.

4.1.2. Celeridad de la onda.

La celeridad de la onda es la velocidad a la que se propaga el fenómeno transitorio en el ducto, en dirección aguas arriba o aguas abajo (figura 4.1). Para determinar el valor de este parámetro se utiliza la ecuación 4.3, cuando se cuenta con una tubería de pared delgada y sin anclajes.

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

Donde:

- K módulo de elasticidad volumétrica del fluido.
- ρ densidad del fluido.
- E módulo de la elasticidad de *Young* del material de la tubería.
- D diámetro de la tubería.
- e espesor de la tubería.

4.1.3. Periodo de la tubería y tiempo de maniobra.

El periodo o fase de la tubería es el tiempo que tarda la onda de sobrepresión 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 4.4.

$$T = \frac{2L}{a} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

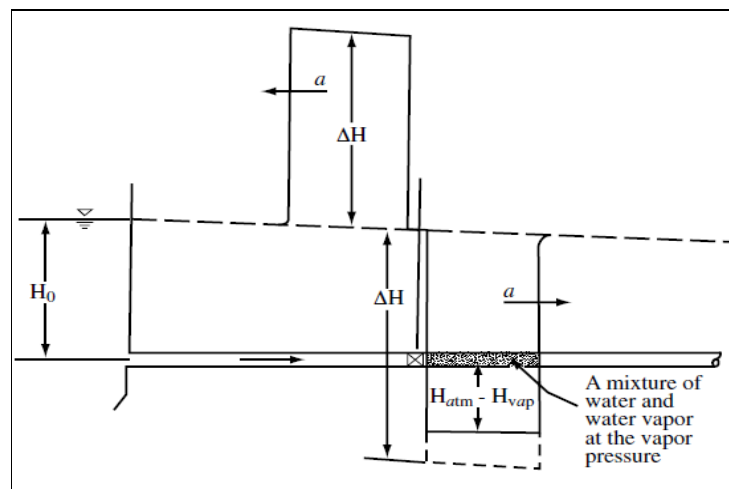
- T periodo o fase de la tubería.
- L longitud de la conducción.

Si la maniobra de operación de la válvula es menor que el periodo de la tubería ($t < T$) se considera que es rápida o brusca, pero si esta operación tarda un tiempo mayor que el periodo de la tubería ($t > T$) se considera que es lenta.

4.1.4. Separación de columna.

Los fenómenos transitorios en una tubería se asocian generalmente a altas presiones; sin embargo, también se presentan cuando existe una disminución importante de la presión. Esta depresión puede generar deformaciones en el ducto o hasta el colapso de sus paredes. Si la presión local del líquido cae hasta valores iguales o menores que la presión de vapor, entonces el líquido hierve (se produce cavitación y se vaporiza), formando grandes bolsillos con los gases no disueltos y el vapor (figura 4.6). Este fenómeno se denomina separación de columna.

Figura 4.6 Separación de columna aguas abajo de una válvula, luego de un cierre súbito



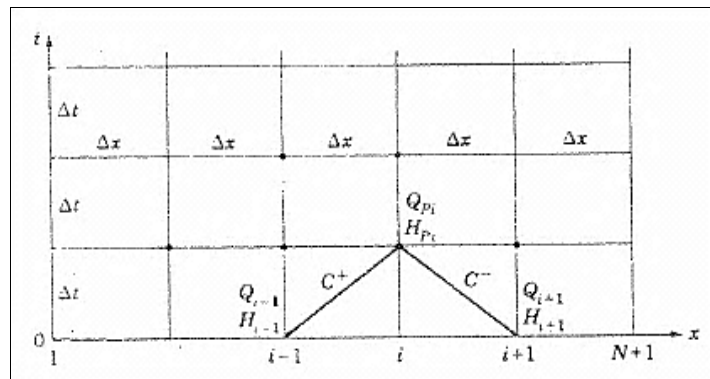
Fuente: Larock, et al., *Hydraulic of Pipeline Systems*, p. 392.

4.1.5. Método de las características.

Debido a la naturaleza diferencial del sistema de ecuaciones, compuesto por las ecuaciones 4.1 y 4.2, resulta muy complicado encontrar una solución explícita para la presión o la velocidad. 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 un tiempo dado (figura 4.7). La característica positiva (C^+) sólo 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 la característica negativa (C^-) sólo 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}).

Figura 4.7 Malla rectangular para la solución por el método de las características



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

Para solucionar las ecuaciones de momentum y continuidad, Streeter y Wylie (1988) sugieren combinar las ecuaciones 4.1 y 4.2 por medio de un multiplicador desconocido λ ($L=L_1+\lambda L_2$), como se muestra en la ecuación 4.5.

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \lambda \left(\frac{1}{\rho \lambda} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) + g \sin \theta + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Teniendo en cuenta que la ecuación 4.5 sólo se satisface si $\lambda = \pm 1/\rho a$, es decir:

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

La característica positiva se puede expresar como la ecuación 4.6 y la negativa como la ecuación 4.7, en términos de la altura piezométrica y el caudal.

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

$$C^-: \quad H_i = C_M + B_M Q_i \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

H_i altura piezométrica en el punto deseado.

Q_i caudal en el punto deseado.
 C_p coeficiente estimado con la ecuación 4.8.

$$C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

B_p coeficiente estimado con la ecuación 4.9.

$$B_p = B + R|Q_{i-1}| \quad \text{Ecuación 4.9}$$

C_M coeficiente estimado con la ecuación 4.10.

$$C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

B_M coeficiente estimado con la ecuación 4.11

$$B_M = B + R|Q_{i+1}| \quad \text{Ecuación 4.11}$$

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

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

B coeficiente, como se muestra en la ecuación 4.12.

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

R coeficiente, como se muestra en la ecuación 4.13.

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

A sección transversal interna de la tubería.

g aceleración de la gravedad.

Entonces, para un punto cualquiera en las secciones interiores de la malla se puede estimar el caudal con la ecuación 4.14 y la altura piezométrica con la ecuación 4.15.

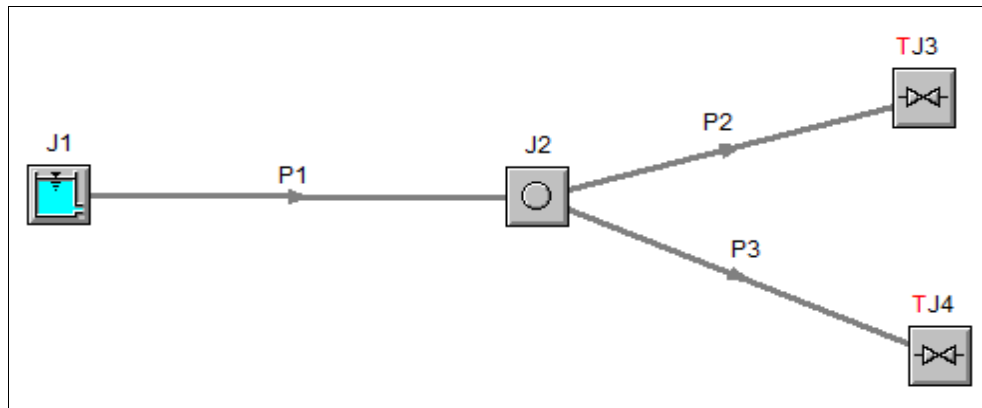
$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

$$H_i = C_P - B_P Q_i \quad \text{Ecuación 4.15}$$

- **Condiciones de frontera**

Las condiciones de frontera son los valores del caudal o la altura piezométrica conocidos o que se pueden estimar fácilmente, que constituyen los datos de partida de los cálculos. Por lo general, corresponden a las condiciones hidráulicas en los extremos de los tramos de tubería. Las condiciones de frontera que se deben emplear son particulares en cada sistema. Por ejemplo, para la red que se muestra en la figura 4.8 se pueden identificar tres fronteras: el depósito, la bifurcación y las válvulas en la descarga.

Figura 4.8 Topología típica de una bifurcación



- Depósito: es un parámetro conocido, que en este caso corresponde al nivel del agua en el tanque. Este valor puede ser constante o variable.
- Bifurcación: en este caso es necesario que se satisfaga la ecuación de continuidad y se suponga una altura piezométrica común al final de cada tubería (Streeter & Wylie, 1988). La altura piezométrica en la unión se puede

estimar mediante la ecuación 4.16, mientras que el caudal para los ductos 1, 2 y 3 se calcula con las ecuaciones 4.17, 4.18 y 4.19, respectivamente.

$$H_u = \frac{C_{P_1}/B_{P_1} + C_{M_2}/B_{M_2} + C_{M_3}/B_{M_3}}{\frac{1}{B_{P_1}} + \frac{1}{B_{M_2}} + \frac{1}{B_{M_3}}}, \quad \text{Ecuación 4.16}$$

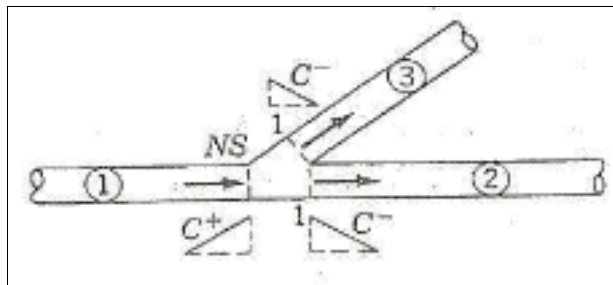
$$Q_1 = -\frac{H_u}{B_{P_1}} + \frac{C_{P_1}}{B_{P_1}} \quad \text{Ecuación 4.17}$$

$$-Q_2 = -\frac{H_u}{B_{M_2}} + \frac{C_{M_2}}{B_{M_2}} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

$$-Q_3 = -\frac{H_u}{B_{M_3}} + \frac{C_{M_3}}{B_{M_3}} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde el subíndice 1 corresponde a la tubería principal y los subíndices 2 y 3 a las tuberías aguas abajo de la bifurcación (figura 4.9).

Figura 4.9 Esquema de las características en la bifurcación



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

- Válvula aguas abajo: el caudal que pasa por ésta se calcula mediante la ecuación 4.20 y la altura piezométrica con la ecuación 4.15, considerando que la válvula trabaja como un orificio y que la característica que se puede utilizar en este caso es la positiva.

$$Q_i = -gB_p(C_dA_v)^2 + \sqrt{[gB_p(C_dA_v)^2]^2 + (C_dA_v)^2 2g(Z_v - C_p)}$$

Ecuación 4.20

Donde:

Z_v cota del eje de la válvula.

4.2. Dispositivos de control

Los dispositivos de control son los elementos que permiten regular el funcionamiento de las redes de distribución. Entre otros, existen los siguientes: del tipo regulador de caudal, de presión y válvulas de cierre.

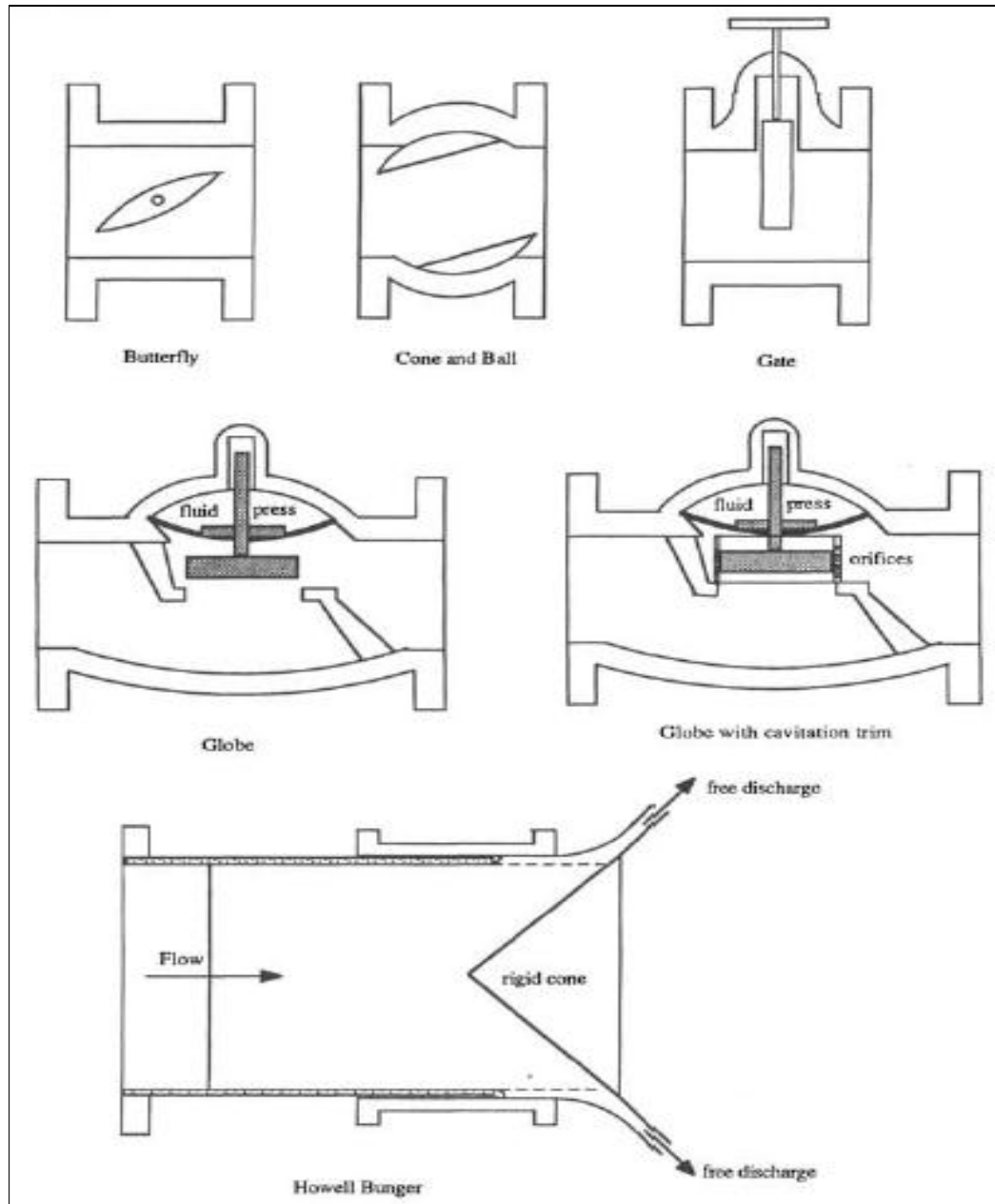
Según Salas y Urrestarazu (2007), un regulador es un equipo que induce una pérdida de carga adicional de energía a la red para proporcionar un valor constante de presión o de caudal, mientras que las válvulas son elementos físicos que permiten controlar el paso de agua en una tubería.

La válvula es el único dispositivo de control que puede producir un evento transiente, ya que permite inducir cambios rápidos de presión y caudal en una operación normal, mientras que los elementos reguladores tienden a mantener el funcionamiento en condiciones permanentes. Por esta razón, en este estudio sólo se considera necesario analizar la influencia de la operación de válvulas.

4.2.1. Válvulas de cierre.

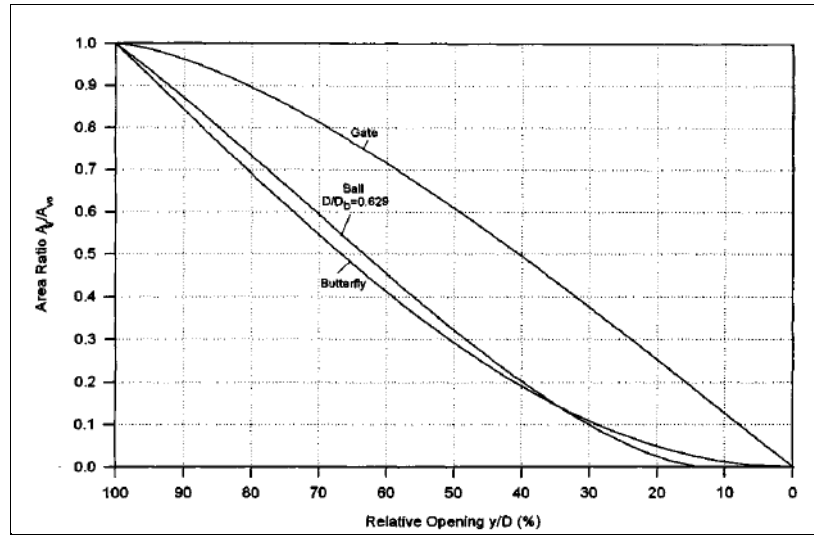
Existen varios tipos de estas válvulas: de compuerta, mariposa, globo, Howell Bungler, entre otras, como se muestra en la figura 4.10. Su principal diferencia es la forma como varía el área respecto del grado de apertura, lo cual se debe al tipo de mecanismo de control que utilizan. En la figura 4.11 se presenta la variación de la relación de área para los diversos tipos de válvulas.

Figura 4.10 Tipos de válvulas



Fuente: Tullis, *Hydraulics of Pipelines*, p. 83.

Figura 4.11 Variación de la relación de área para diferentes tipos de válvulas



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

4.2.1.1 Esquemas de pérdidas.

La caída de presión a través de una válvula es proporcional al caudal y varía en función del grado de apertura en el que se encuentre.

Se han desarrollado diferentes formas de interpretar el gasto de energía en una válvula. Usualmente se refieren a factores que relacionan la pérdida local con la velocidad de flujo o el caudal descargado. Entre los esquemas más utilizados se encuentran el coeficiente de pérdida, el coeficiente de descarga y el coeficiente de caudal, y se estiman con las ecuaciones 4.21, 4.22 y 4.23, respectivamente.

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

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

Donde:

ΔH pérdida de energía a través de la válvula.

Q caudal descargado.

V velocidad del flujo en la conducción en estado permanente.

- g aceleración de la gravedad.
- A área de la válvula completamente abierta.
- K_l coeficiente de pérdida de la válvula.
- C_d coeficiente de descarga de la válvula.

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

$$C_v = \frac{Q}{\left(\frac{\Delta P}{GS}\right)^{0,5}} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

Donde:

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

Así mismo, existen expresiones que permiten encontrar la equivalencia entre los tres métodos de pérdidas (Tullis, 1989), como se muestra en las ecuaciones 4.24 y 4.25.

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

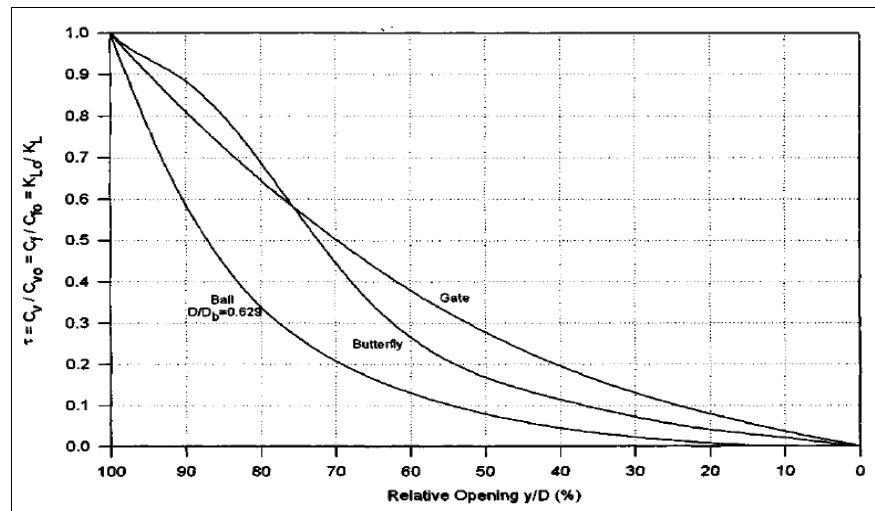
$$C_v = \left[\frac{890 D^4 C_d^2}{1 - C_d^2} \right]^{0,5} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Donde:

- D diámetro interno, en pulgadas.

Los valores de los coeficientes de pérdidas varían en función de la apertura relativa para cada tipo de válvula, como se muestra en la figura 4.12.

Figura 4.12 Variación típica de los coeficientes de pérdidas para diferentes tipos de válvulas



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

4.2.1.2 Recomendaciones de operación.

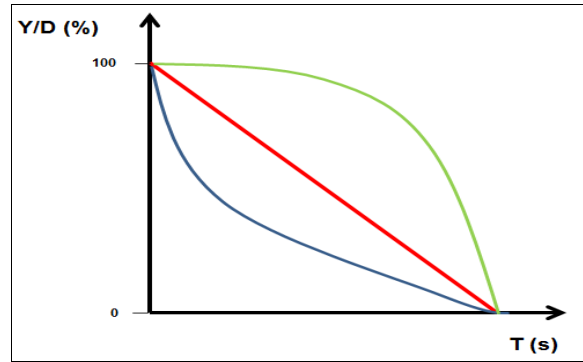
La recomendación más ampliamente aceptada es realizar las maniobras de cierre de las válvulas en un tiempo (t), de forma que ésta se pueda considerar como lenta, es decir, que $t > 2 L/a$ (véase numeral 4.1.3.).

4.2.1.3 Ley de cierre.

Una ley de cierre es la forma como se opera una determinada válvula y está relacionada con la velocidad con que varía la apertura relativa (Y/D) en función del tiempo. En la figura 4.13 se presentan las leyes de cierre más utilizadas.

La ley de cierre es un aspecto relevante en la intensidad del fenómeno, por cuanto entre más suave sea la transición de la condición de apertura máxima al cierre, menor será el aumento de presión en la tubería, como lo demuestra la línea azul que aparece en la figura 4.13. Sin embargo, como es un aspecto ampliamente estudiado no se consideró necesario incluirlo en los análisis del presente estudio de sensibilidad. En su defecto, se empleó la variación lineal que permite estimar fácilmente los valores de los coeficientes de pérdidas, con base en las variaciones que se presentan en la figura 4.12.

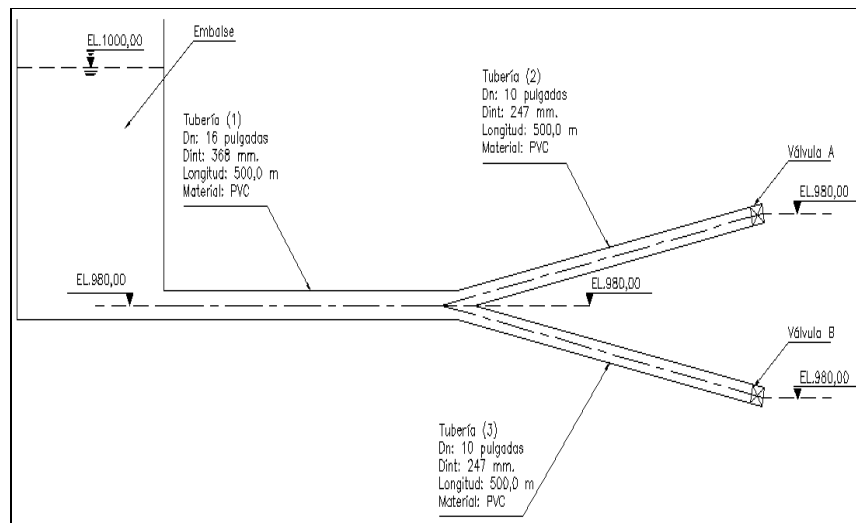
Figura 4.13 Diferentes leyes de cierre



4.3. Estudios específicos de sensibilidad en un sistema a presión

De acuerdo con la revisión bibliográfica que se presentó en el numeral 4.1. son muchas las variables que afectan la magnitud del flujo transitorio. Por esta razón es necesario reducir el número de variables que se deben utilizar para el análisis de sensibilidad a la presión. Con este fin se revisaron diferentes libros y publicaciones en revistas indexadas, en los cuales se presentan conclusiones relevantes sobre la importancia de determinadas variables. En especial, se utilizaron las conclusiones del documento denominado “Fenómenos transitorios en una bifurcación por operación de dispositivos de control. Estudio de sensibilidad”, en el que se analizó un problema en particular, que se muestra en la figura 4.14

Figura 4.14 Esquema del sistema de distribución analizado



4.3.1. Tiempo de maniobra (t)

Este tiempo es un factor determinante en la respuesta del sistema ante un evento transitorio, ya que la maniobra puede llegar a ser brusca en función de su duración, como se indica en el numeral 4.1.3.

En la ecuación de continuidad (ecuación 4.12) se observa una relación inversa entre el tiempo de la maniobra y la variación de la presión. Por lo tanto, se espera que una maniobra rápida produzca grandes cambios en el valor de la presión. Sin embargo, es posible identificar un tiempo de cierre a partir del cual los cambios de presiones positivas o negativas no sean significativos y no representen peligro para la estabilidad de la tubería (Gelvez, 2014).

Se debe realizar el análisis de sensibilidad a las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), a partir de diferentes tiempos de maniobra, para encontrar un tiempo que permita minimizar los efectos del flujo transitorio.

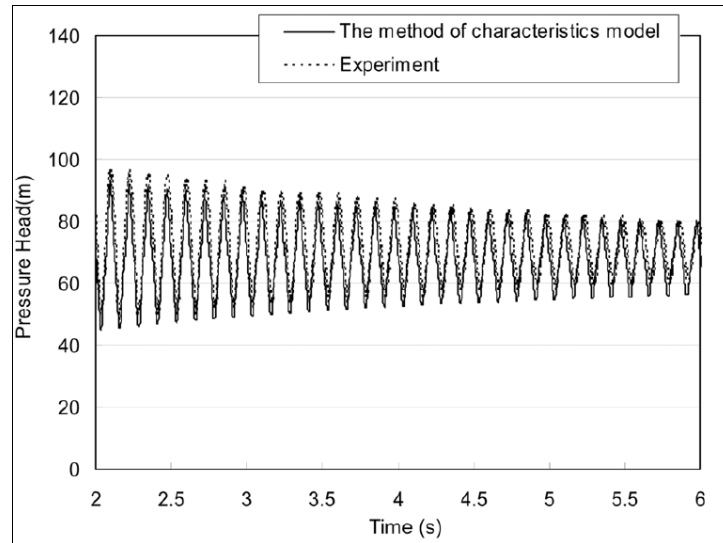
4.3.2. Fricción (f)

El papel de la fricción en un evento de flujo transitorio es principalmente la disipación de éste. Por lo general, se supone un valor constante del factor de fricción, a pesar de que varía en función del caudal que circula por el sistema.

Con base en los documentos consultados, se confirma que cuando el valor de la sobrepresión se estima con un factor de fricción constante no se ve afectado significativamente. Sin embargo, algunos autores señalan que el error se presenta cuando se realiza esta misma presunción para instantes posteriores al máximo de sobrepresión, utilizando el método de las características para el cálculo. Según Kwon (2007), la disipación de la energía será subestimada, haciendo que se considere un decaimiento más lento al real (figura 4.15). Wichowski (2006) afirma que se deben tener en cuenta los procesos denominados de relajación, los cuales incluyen un conjunto de fenómenos que causan la conversión irreversible de energía en calor. Por esta razón, se debe suponer un

valor mayor del factor de fricción que el estimado con la ecuación de Colebrook-White en los instantes posteriores al máximo de presión.

Figura 4.15 Comparación de la disipación de energía a partir de un modelo experimental y la calculada por el método de las características



Fuente: Kwon, Analysis of Transient Flow in a Piping System, p. 212.

Para el presente estudio de sensibilidad no se considera necesario emplear un factor de fricción modificado que tenga en cuenta la disipación de la energía para instantes posteriores al máximo de presión, ya que aquí sólo se tienen en cuenta los valores máximos y mínimos de cada simulación. Sin embargo, se empleará la opción de cálculo variable del factor de fricción dispuesto en el programa AFT Impulse[®], considerando que el gasto computacional no se aumenta significativamente.

4.3.3. Longitud de la tubería (L)

La relación que existe entre la longitud de la tubería y la magnitud del fenómeno depende del tiempo de la maniobra. Si la tubería es larga, el periodo de la operación también y necesitará un tiempo de cierre largo para evitar que la respuesta del sistema sea brusca. En este contexto, existe interdependencia entre las variables del tiempo de la maniobra y la longitud de la tubería.

Por otra parte, es una práctica común omitir los análisis de transitorios para tuberías de poca longitud, ya que se considera que allí no se producen efectos importantes. Boulos et al. (2005) afirman que los sistemas de distribución a presión de corta longitud (es decir, <600 m) tienden a ser menos vulnerables a problemas asociados con transientes hidráulicos, debido a que la reflexión de la onda tiende a limitar los cambios en presión y contrarrestan los efectos iniciales del transitorio. En este estudio no se tuvo en cuenta esta recomendación, porque se consideró que el límite superior del rango definido como de longitud corta es muy amplio.

4.3.4. Número de segmentos (N)

La elección de N tiene poco efecto sobre la solución. Si se evalúa el mismo sistema con diferentes números de segmentos, la diferencia entre la altura de presión máxima o mínima no es significativa entre una simulación y otra.

Hay que señalar dos situaciones: primero, excepto en el caso de un cambio rápido de la velocidad hay poco que ganar con un N más grande que el necesario. Segundo, para mayor número de segmentos (...) también debemos seleccionar Δt suficientemente pequeño para capturar con precisión la variación en el tiempo de las condiciones de contorno como el movimiento de una válvula. Valores más pequeños para Δt están directamente vinculados a valores más grandes de N (Larock, B., Jeppson, R. & Watter, G. (2000). *Hdraulics of Pipelines Systems*. CRC Press, p. 362).

De acuerdo con esta opinión, no se considera necesario realizar un estudio de sensibilidad a partir del número de segmentos de cálculo.

4.3.5. Pendiente de la tubería

Larock, Jeppson y Watter (2000) afirman que para tuberías simples, con pendiente superior a $\pm 25\%$, los resultados son casi idénticos para ambos extremos de la pendiente. Por lo tanto, se debería suavizar el perfil, de tal forma que pueda reducir el número de tuberías que se van a simular.

Por esta razón, en este estudio no se incluyó la pendiente de la tubería.

4.3.6. Válvulas

La forma como cada tipo de válvula varía el área y el coeficiente de pérdidas, en función de la apertura relativa (Y/D), induce diferentes tasas de decaimiento del caudal. Esto sugiere que para una misma ley de cierre y tiempo de maniobra, la red debería experimentar diferencias cuando se acciona con distintos tipo de válvulas.

El autor (2014) encontró que los valores máximos y mínimos de altura piezométrica de un sistema bifurcado, producidos por maniobras de cierre súbitas, no dependen en principio del tipo válvula, ya que son aproximadamente los mismos. En este sentido sería necesario confirmar la validez de esta afirmación identificando diferencias cuando los tiempos de maniobra son lentos.

4.3.7. En una red con bombeo

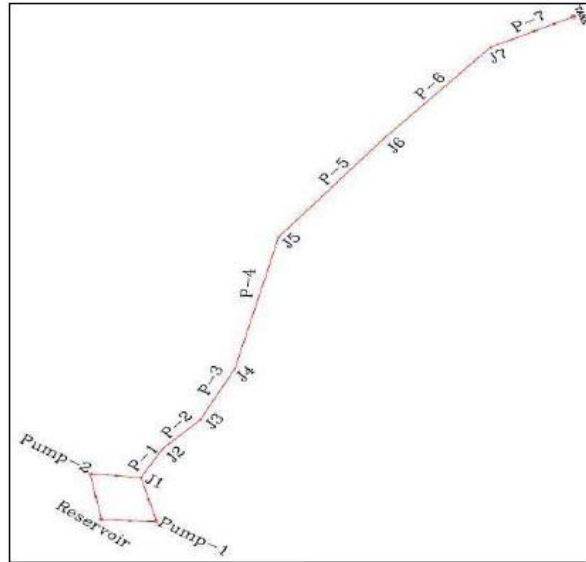
Teniendo en cuenta la naturaleza de las redes con bombeo, las conclusiones de los estudios encontrados se agruparon con el fin de considerarlas para el análisis en las redes a gravedad. Sin embargo, hubo dos estudios con conclusiones muy diferentes, cuyas recomendaciones no se tuvieron en cuenta.

Por un lado, Emadi y Solemani (2011) afirman que los parámetros a los que el golpe de ariete es más sensible en una red con bombeo son el momento de inercia de la bomba y el electromotor, diámetro, tipo y espesor de la tubería, y la temperatura del agua, respectivamente. Para llegar a estas conclusiones analizaron la importancia de cada variable solicitada por el software Hammer[®], que les permitió estimar el máximo golpe de ariete en el esquema que se muestra en la figura 4.16, correspondiente a la estación de bombeo *Kuhrang*, que tiene las siguientes características: el caudal total es de 200 litros de agua por segundo para el riego agrícola en *Cheshme Morvarid*, una altura dinámica de 194 metros y 1,5 kilómetros de ductos de acero.

Adicionalmente, Emadi y Solemani encontraron lo siguiente:

- Con cada incremento de 100 mm en el diámetro de la tubería, el máximo golpe de ariete se reduce en 74 mca. Con condiciones similares, el máximo golpe de ariete se reduce debido a la utilización de tubería de GRP en 74 mca más que el de la tubería de acero.

Figura 4.16 Esquema analizado por Emadi y Solemani



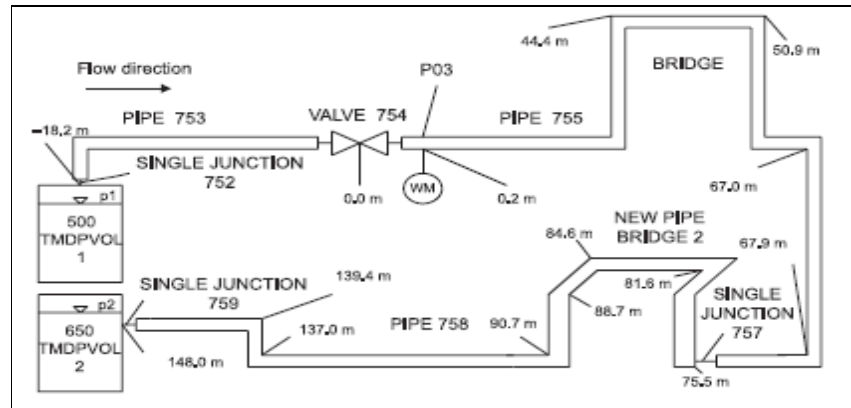
Fuente: Emadi y Solemani, Maximum Wather Hammer Sensitivity Analysis, p. 338.

- Con cada 1 mm de incremento del espesor de la tubería, el máximo golpe de ariete se reduce en 3 mca.
- Duplicando el momento de inercia a 200 Nm^2 el máximo golpe de ariete se reduce en 100 mca. Si el momento de inercia se duplica de nuevo a 400 N.m^2 , la reducción máxima del golpe de ariete será de aproximadamente 15 mca.
- Con cada incremento de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en temperatura el golpe de ariete se reduce 2 mca.

Por su parte, Kaliatka, Kopustinskas y Vaišnoras (2009) recomiendan no excluir el efecto de las diferentes variables, ya que en términos cuantitativos son casi de igual magnitud y su interacción no es muy fuerte, aunque algunas tengan mayor importancia. Este estudio consistió en aplicar el método de la Prueba de Sensibilidad de Amplitud de Fourier a los resultados obtenidos con el programa RELAP5/Mod3.3® para la red que se muestra en la figura 4.17.

Adicionalmente, estos mismos autores encontraron lo siguiente:

Figura 4.17 Red analizada por Kaliatka, Kopustinskas y Vaišnoras



- El coeficiente de pérdida de energía en la unión aguas abajo de la válvula de acción rápida es el parámetro que más contribuye a la varianza de la presión máxima. La implicación práctica de este resultado sugiere el conocimiento preciso del coeficiente de pérdida de energía de flujo en los componentes de la tubería aguas abajo de la válvula, para reducir más eficazmente la incertidumbre de la presión máxima calculada.
- El mayor grado de afectación a la rugosidad de la pared y la presión en la bomba tienen igual importancia, pero son significativamente más bajos que el coeficiente de pérdida de unión en el tramo de la tubería aguas abajo de la válvula de acción rápida.

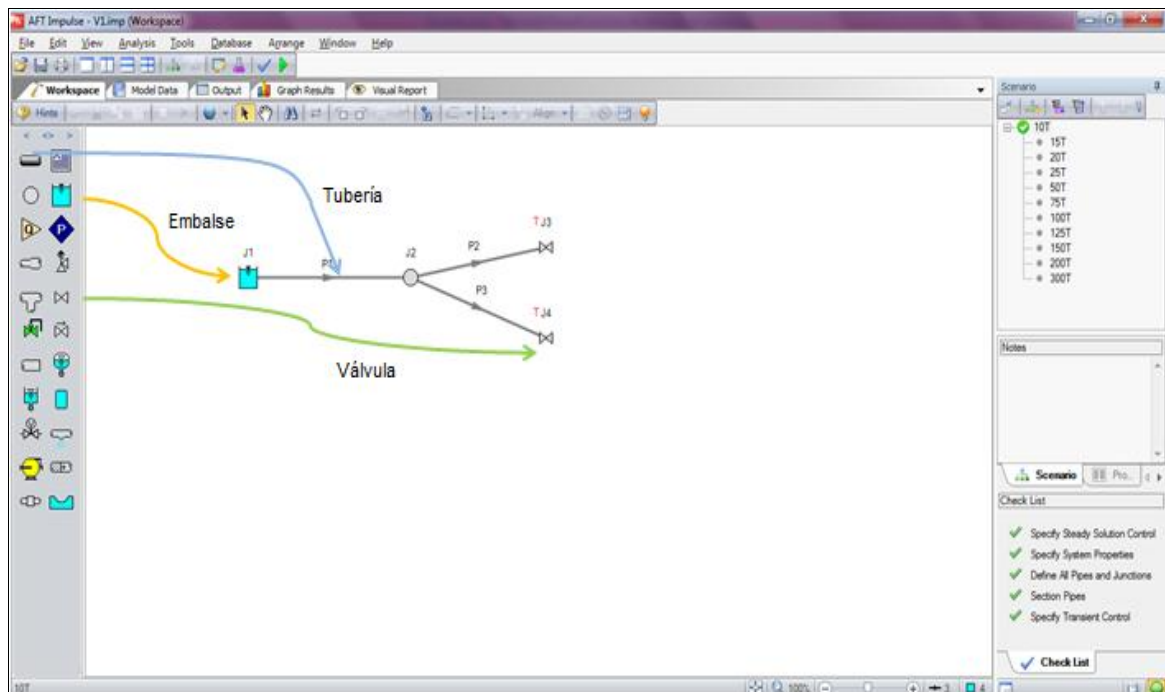
Capítulo 5

Modelo comercial para el cálculo de transitorios. Aft impulse®

En este estudio se empleó el programa AFT Impulse® (versión 5.0) para simular los flujos transitorios. Este software lo desarrolló Applied Flow Technology Corp.

El programa tiene una interfaz de trabajo amigable que permite construir fácilmente un modelo. Solamente se deben arrastrar los elementos del lado izquierdo de la pantalla e interconectarlos utilizando el icono de la tuberías, como se muestra en la figura 5.1.

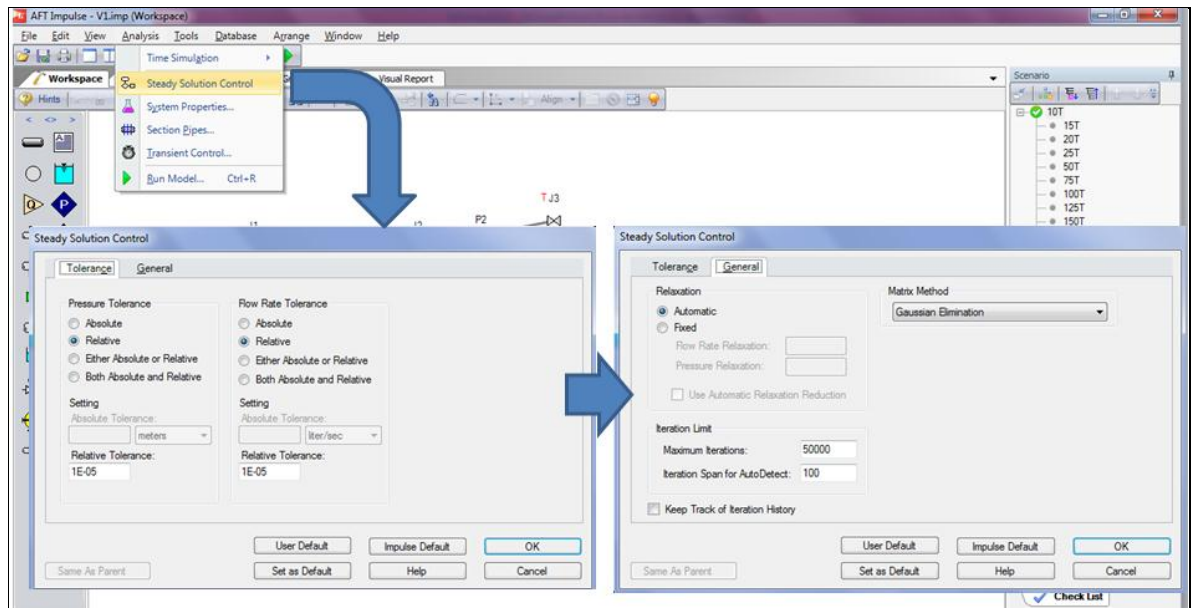
Figura 5.1 Espacio de trabajo en AFT Impulse®



Para que el programa realice los cálculos es necesario cumplir con los siguientes pasos:

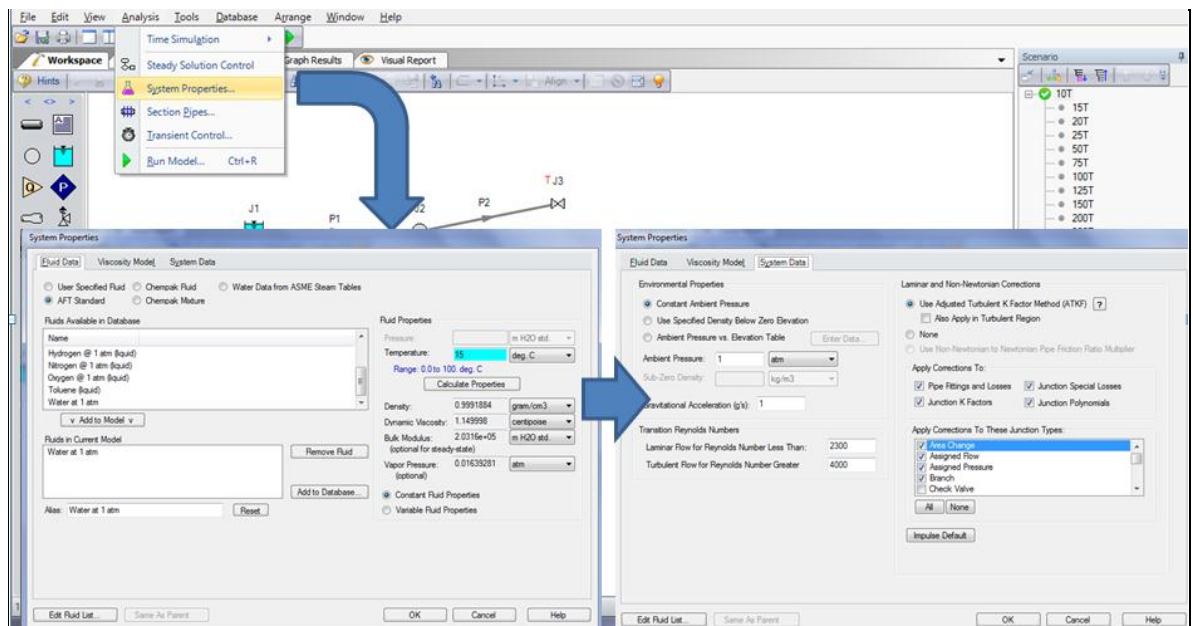
1. Indicar la forma de solución del flujo permanente. Para esto se debe seleccionar la opción Analysis/ Steady Solution Control (figura 5.2) y escoger la configuración deseada

Figura 5.2 Ventana de Steady Solution Control



2. Definir las propiedades del sistema, lo cual implica establecer el tipo de fluido y sus características físicas, el esquema de viscosidad, y datos como el valor de la gravedad y la presión atmosférica, entre otros. Esta acción se debe realizar en las ventanas que aparecen en la figura 5.3.

Figura 5.3 Definición de las propiedades del sistema



- Definir las propiedades de las tuberías y demás componentes del sistema, dando doble clic sobre los elementos de la ventana de trabajo. En la figura 5.4 se presenta el ejemplo para una tubería. En este paso se debe definir el origen flujo transitorio en el elemento que servirá como fuente (figura 5.5).

Figura 5.4 Definición de las características de una tubería

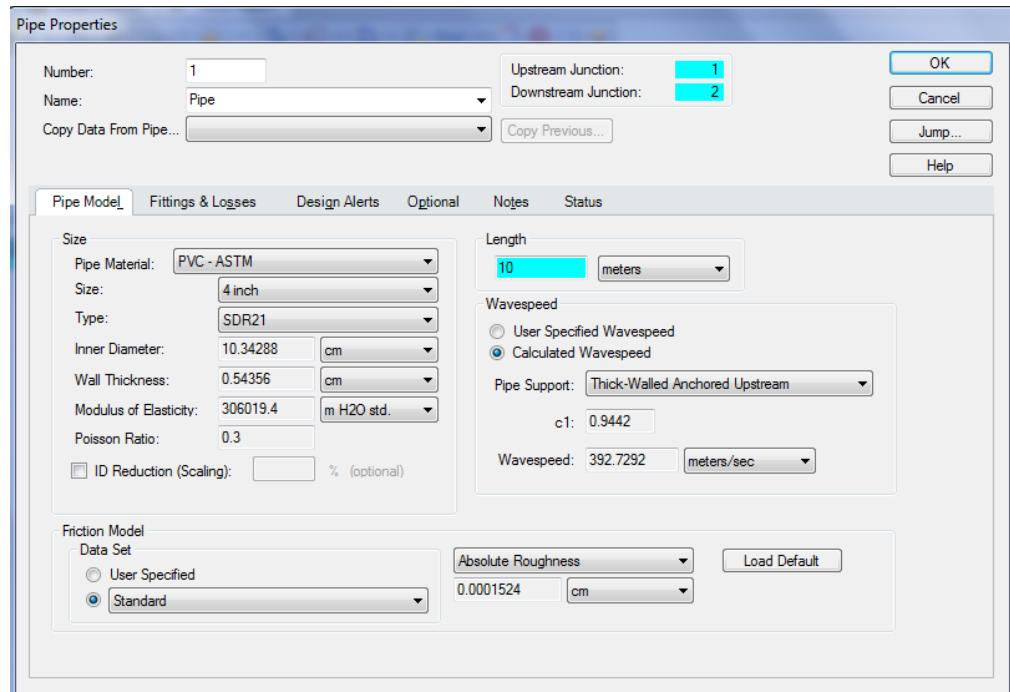
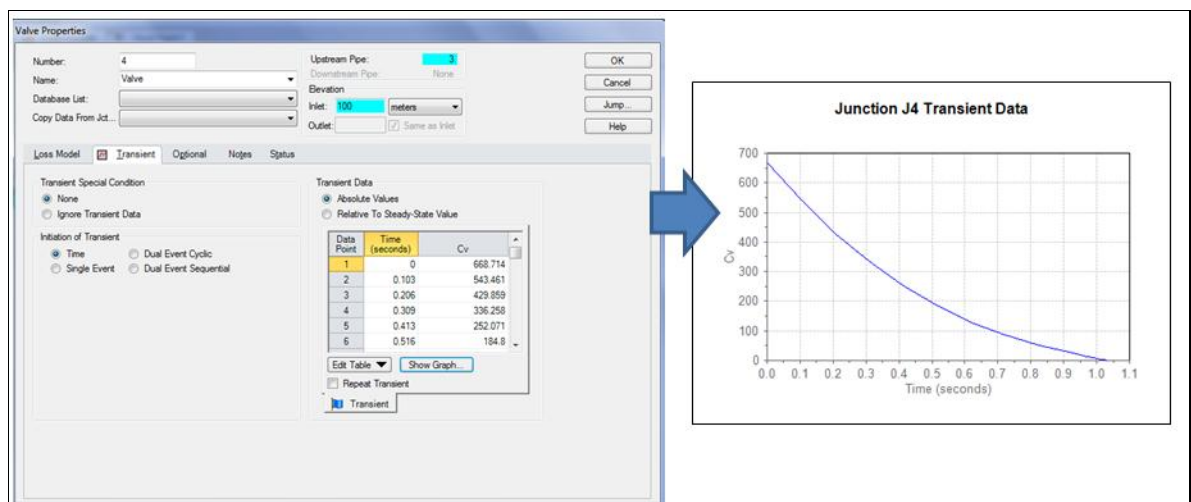
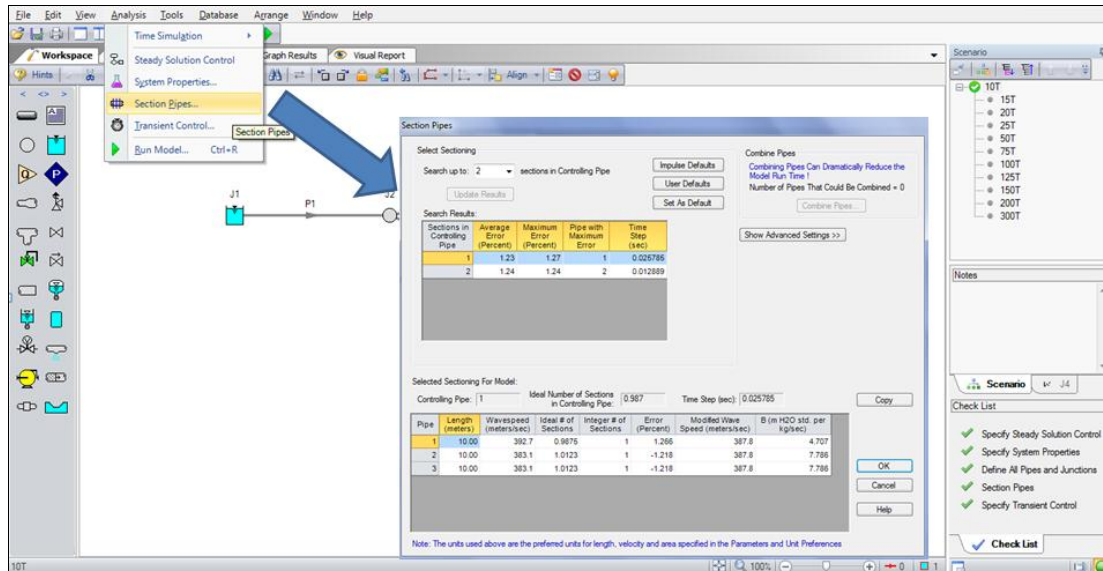


Figura 5.5 Ejemplo de la inducción de transitorio en una red de tubería



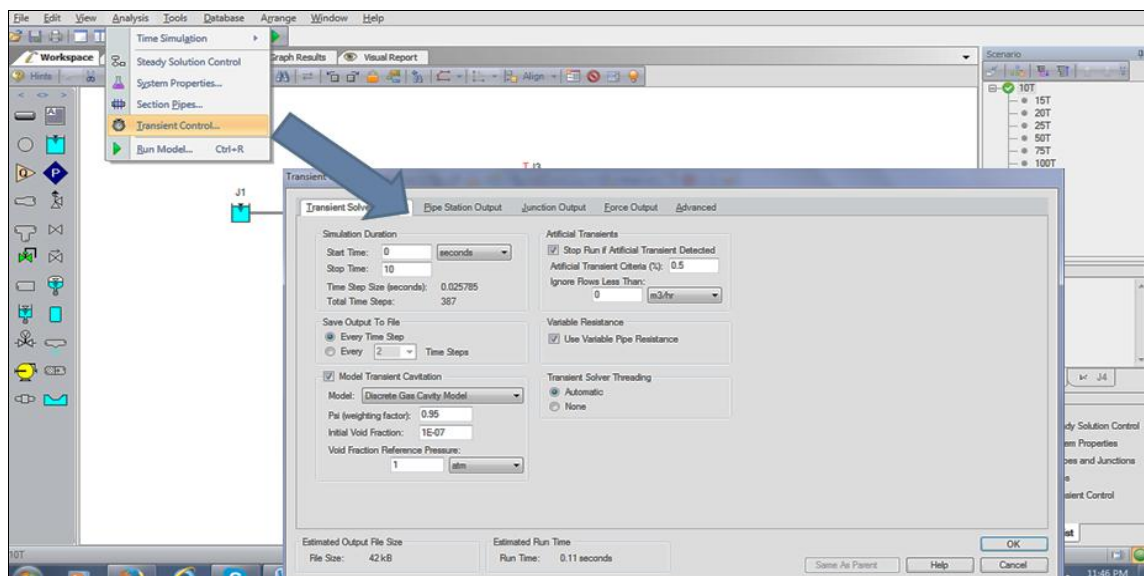
- Indicar el número de segmentos que se van a utilizar para que el programa estime el Δt más adecuado, como se muestra en la figura 5.6.

Figura 5.6 Definición del Δx y el Δt .



- Escoger el tiempo de duración de la simulación y los esquemas adicionales de solución, como fricción variable y solución con cavitación. Este paso se debe realizar en las ventanas que se muestran en la figura 5.7.

Figura 5.7 Definición de la solución del transitorio



Una vez cumplidos estos cinco pasos el programa permite ejecutar la modelación desde la opción *Run Model*.

Para visualizar los resultados AFT Impulse® cuenta con tres opciones (figura 5.8): la opción *Output* muestra la solución completa del transitorio en forma de tabla, *Graph Results* permite observar una gráfica a la vez de los diferentes parámetros evaluados para todos los instantes de tiempo y *Visual Report* presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Figura 5.8 Opciones de visualización de los resultados

The screenshot shows the AFT Impulse - V1.imp (Output) window. The 'Output' tab is selected in the menu bar. The main area displays a table of transient results for pipes. Below the table, there is a section for 'Todos los Empalmes' (All Joints) with a sub-table for 'Reservorio' (Reservoir) and 'Válvula' (Valve). On the right side, there is a 'Check List' with several items checked, indicating successful configuration of simulation settings.

Tubería	Max. Presión de Estan. (m H2O std.)	Max. Presión de Estan. Tiempo (seconds)	Max. Presión de Estan. Estación	Min. Presión de Estan. (m H2O std.)	Min. Presión de Estan. Tiempo (seconds)	Min. Presión de Estan. Estación	Max. Flujo Volumétrico (liter/sec)	Max. Flujo Volumétrico Tiempo (seconds)	Max. Flujo Volumétrico Estación	Min. Flujo Volumétrico (liter/sec)	Min. Flujo Volumétrico Tiempo (seconds)	Min. Flujo Volumétrico Estación	Max. Volumen de Vapor (meters3)
1	49.40	1.057	1	0.1699	1.547	1	38.92	0.000	0	-13.312	1.083	0	8.098E-05
2	71.44	1.031	1	0.1695	1.238	1	19.46	0.02579	0	-3.602	1.083	0	2.517E-04
3	71.44	1.031	1	0.1695	1.238	1	19.46	0.02579	0	-3.602	1.083	0	2.517E-04

Empal (Estable)	Nombre	P Estática En (m H2O std.)	P Estática Sal (m H2O std.)	P Stag En (m H2O std.)	P Stag Sal (m H2O std.)	Rata de Flujo Vol. a través del Emp (liter/sec)	Flujo de Masa a través del Emp (kg/sec)	Factor de Pérdida (K)
1	Reservoir	10.333	13.33	10.33	13.33	38.92	38.88	0.0000
2	Branch	11.017	11.02	11.87	11.87	N/D	N/D	0.0000
3	Valve	9.734	10.33	10.48	10.33	19.46	19.44	0.2000
4	Valve	9.734	10.33	10.48	10.33	19.46	19.44	0.2000

Capítulo 6

Selección de las variables que se deben utilizar para el análisis de sensibilidad

Las variables que se deben emplear para el análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima-presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima-presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) son: velocidad de flujo, tiempo de maniobra, tipo de válvula, diámetro, relación longitud-diámetro, relación de longitudes de la tubería principal y ramales, y tipología. Para definir el número de variables que se debían emplear durante este estudio se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos, los cuales se resumen a continuación:

- Se revisaron diversas fuentes de información (numeral 4.3.), que permitieron obviar el análisis de sensibilidad de las siguientes variables: factor de fricción, número de segmentos de cálculo y pendiente de la tubería. Además, se estableció que el análisis de sensibilidad debía realizarse con base en diferentes tiempos de duración de la maniobra.
- Al analizar las ecuaciones de momentum (ecuación 4.1) y de continuidad (ecuación 4.2) se encontró que los términos que determinan la magnitud de las variaciones de presión son los siguientes:
 - Velocidad de flujo en condiciones permanentes. Esta variable se debe incorporar teniendo en cuenta que es un factor que se puede controlar desde el diseño o la operación de la red.
 - Fuente del fenómeno: tiempo de maniobra y tipo de válvula, es decir, la forma como cambia el caudal. Estas variables se deben incorporar, puesto que son factores que se pueden controlar desde el diseño o la operación de la red.
 - Características de la tubería: diámetro, longitud y tipo de material.
 - Características del fluido: densidad, peso y módulo volumétrico. No se consideró necesario realizar la sensibilidad a la presión variando las características del flujo, debido a que sólo se previó analizar sistemas de

distribución, lo cual condiciona a que el fluido que se transporta sea agua. Adicionalmente, esta es una variable difícil de controlar en la red.

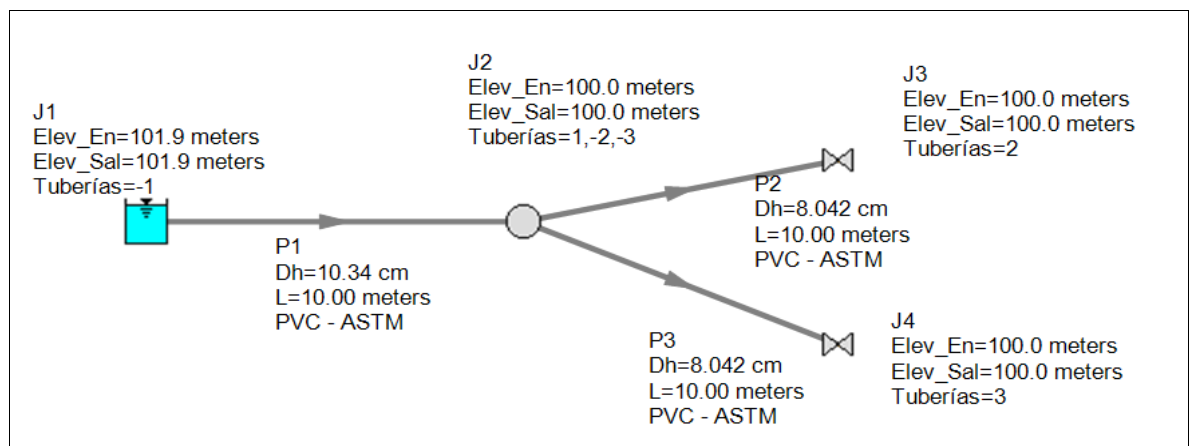
- El rango de las variables que se deben utilizar en la sensibilidad de la presión se definen a partir de simulaciones de prueba y de las conclusiones que se obtienen en el desarrollo del estudio.
- La sensibilidad de la presión a cada variable se analiza dejando fijos los mismos tiempos de cierre y la velocidad, y modificando únicamente la variable de interés.
- Durante las simulaciones se hace una reducción adicional del rango de cada variable que se va a utilizar en la evaluación, analizando previamente las conclusiones obtenidas.

6.1. Tiempos de maniobra

Los tiempos de maniobra que se van a utilizar son mayores a una vez el periodo de la tubería ($T = 2 L/a$), ya que para tiempos menores se espera que el fenómeno transitorio sea brusco. Adicionalmente, no se tienen en cuenta tiempos de maniobra iguales o menores a 1,0 s, porque no es común que las válvulas que se utilizan para el análisis de sensibilidad operen con tal rapidez.

Para definir los tiempos de maniobra se realizó una simulación de prueba a la red (figura 6.1), compuesta por una tubería principal de 4" (10,34 cm) y dos ramales de 3" (8,042 cm), en la cual fluye agua a 3 m/s.

Figura 6.1 Red de prueba para definición de tiempos de simulación



Se simuló un rango de tiempos de cierre con límite inferior en 1T (si es $T > 1,0$ s) y máximo de 300T, con el fin de evidenciar tiempos de maniobra que produzcan pequeños cambios de sobrepresiones, con referencia a la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), como se presenta en la figura 6.2. Los tiempos de cierre empleados se estiman como el periodo de la tubería (T) por el número de repeticiones (N) que se desea analizar (N x T) del mismo.

Con base en los resultados de la figura 6.2, se adoptaron los tiempos de maniobra de la tabla 6.1 para el análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).

Figura 6.2 Reducción típica de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática, con el aumento del tiempo de la maniobra

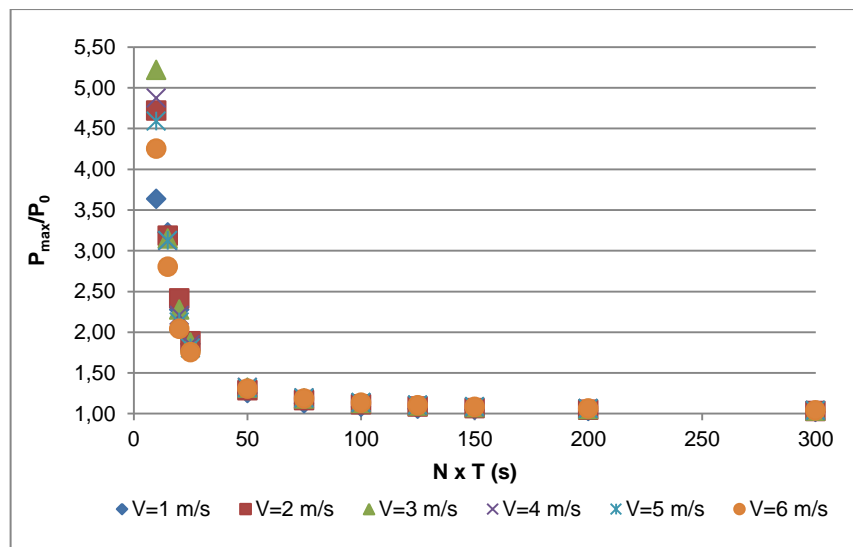


Tabla 6.1 Tiempos de maniobras evaluados

Tiempo de maniobra (s)
1T
2T
3T
4T
5T
10T

Tiempo de maniobra (s)
15T
20T
25T
50T
75T
100T
125T
150T
200T
300T

6.2. Velocidades en flujo permanente

Se emplean velocidades entre 1,0 y 6,0 m/s. No se consideran valores inferiores a este rango, puesto que se utilizan poco. Por lo general, los diseños buscan tener velocidades más altas para utilizar diámetros más pequeños; sin embargo, el RAS 2000 (Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000) recomienda no utilizar valores superiores a 6 m/s para no producir problemas en la operación de la red. En la tabla 6.2 se presentan las velocidades que se utilizaron para el presente estudio.

Tabla 6.2 Rango de velocidades medias de flujo analizadas

Velocidad de flujo (m/s)
1,0
2,0
3,0
4,0
5,0
6,0

En los diferentes escenarios analizados, la velocidad en la tubería principal es similar a la de los ramales.

6.3. Diámetros y longitudes

Se utiliza un rango de diámetros entre 3 y 20 pulgadas, los cuales se presentan en la tabla 6.3. Estos valores son típicos de redes de distribución con tuberías en PVC.

Tabla 6.3 Diámetros utilizados para la simulación

Diámetro (pulgadas)
3
4
6
12
20

Los diámetros que se muestran en la tabla 6.3 se definieron a través del desarrollo de las simulaciones, a partir de las conclusiones obtenidas. Esto se debió a que durante la revisión bibliográfica no se encontró un criterio unánime para la selección de dichos diámetros.

El proceso para definir el diámetro de una tubería es el siguiente: para cada geometría se define primero el diámetro de la tubería más cercana a la válvula, escogiendo entre los que aparecen en la tabla 6.3. Posteriormente, se selecciona el diámetro de la tubería principal, teniendo en cuenta que permita una velocidad similar en todas las tuberías del sistema.

La extensión de las tuberías empleadas obedece a la relación longitud-diámetro (L/D), de tal forma que se puedan comparar valores adimensionales. En este estudio se emplean las relaciones L/D que aparecen en la tabla 6.4, con el fin de tener valores típicos de longitud para los diámetros seleccionados.

Tabla 6.4 Relación longitud-diámetro (L/D) de la tubería

L/D
400
800

L/D
1500
2500

En este caso no se incluyeron valores menores a $L/D = 400$, considerando que resultarían longitudes muy cortas (menores a 10 m), que no son comunes en redes de distribución abierta. Mientras que el valor superior corresponde a la relación para la cual no se esperan cambios significativos de presión. Esto se sustenta en detalle en el numeral 7.1.4. .

6.4. Material de las tuberías

Las tuberías empleadas para el análisis de sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) fueron de PVC con RDE 21, que es el material que más se utiliza actualmente en el medio colombiano para los diámetros seleccionados en este análisis.

6.5. Topología del sistema de distribución analizado

Para el análisis de sensibilidad se emplearon las topologías que aparecen en las figuras 6.3 y 6.4. Primero, con una configuración sencilla correspondiente a una bifurcación, y luego se empleó una topología con mayor complejidad (trifurcación). Atendiendo las conclusiones obtenidas en el numeral 7.3. , no se utilizó una configuración con más ramificaciones. Adicionalmente, no se incluyeron topologías con ramificaciones intermedias, ya que se estimaba un comportamiento similar al de una bifurcación.

Figura 6.3 Topología 1. Bifurcación

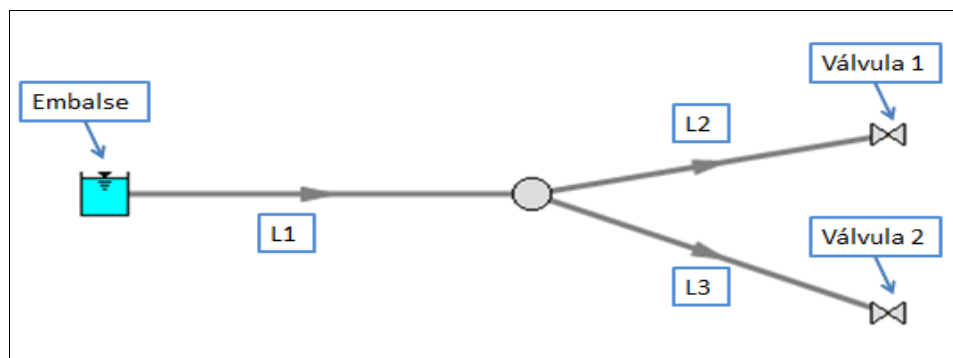
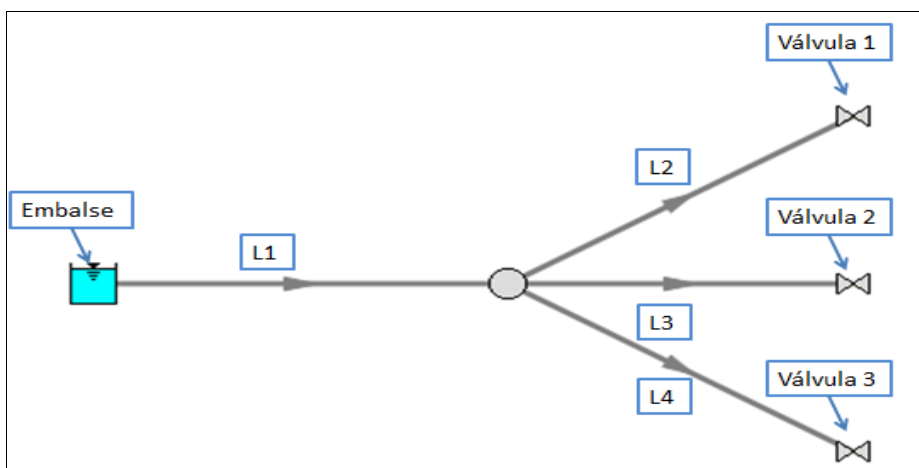


Figura 6.4 Topología 2. Trifurcación



En cada caso se emplearon tres diferentes combinaciones de relación entre la tubería principal y los ramales L_1/D_1 / L_i/D_i . En la tabla 6.5 se presentan las combinaciones de tipologías utilizadas en este estudio. Los valores se seleccionaron para tener en cuenta un rango amplio y posible de esta relación.

Tabla 6.5 Combinaciones de topologías y geometrías analizadas

Tipología	Relación $\frac{L_1}{D_1} / \frac{L_i}{D_i}$		
	1	2	4
Bifurcación	1	2	4
Trifurcación	1	2	4

Los valores de L_i para la longitud de la tubería se definieron de acuerdo con la metodología que se presenta en el numeral 6.3. .

En cada caso, los niveles del embalse se definen de tal forma que suministren la energía necesaria para producir las diferentes velocidades utilizadas para el análisis de sensibilidad a las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$). Las cotas de las tuberías son constantes (100 msnm), para no incluir la pendiente de la tubería en este análisis, teniendo en cuenta lo que se mencionó en el numeral 4.3.5. .

6.6. Tipo de válvula

Para producir el fenómeno transitorio se usaron dos tipos de válvulas y una única maniobra (tabla 6.6). Se seleccionaron las válvulas de compuerta y de mariposa, teniendo en cuenta que la variación de los coeficientes de pérdida es muy diferente entre ellos, lo cual permite identificar claramente el efecto de utilizar diversos tipos de válvulas.

Tabla 6.6 Fuentes de transitorio analizadas

Tipo de válvula	Maniobra
Compuerta	Cierre
Mariposa	Cierre

Para la inclusión en el modelo del efecto del cierre de cada tipo de válvula y maniobra se supone lo siguiente:

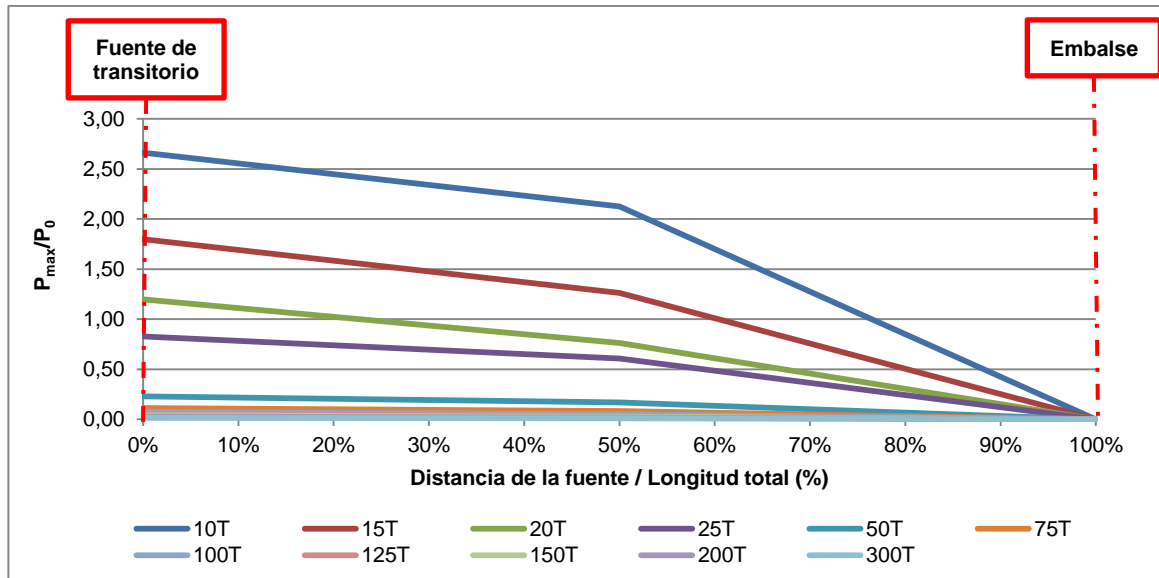
- Variación lineal del grado de apertura (y/D).
- Para el coeficiente de pérdida de cada válvula completamente abierta (K_{L0}) se utiliza el valor que presenta el catálogo de AFT Impulse®. Posteriormente, se calcula el valor del coeficiente de caudal inicial (C_{V0}) con la ayuda de las ecuaciones 4.24 y 4.25, con el fin de utilizar el esquema de pérdida con el que el programa soluciona mejor el flujo transitorio.
- La variación del coeficiente de caudal para aperturas diferentes (C_V) se obtuvo con ayuda de la figura 4.12.

6.7. Punto de evaluación

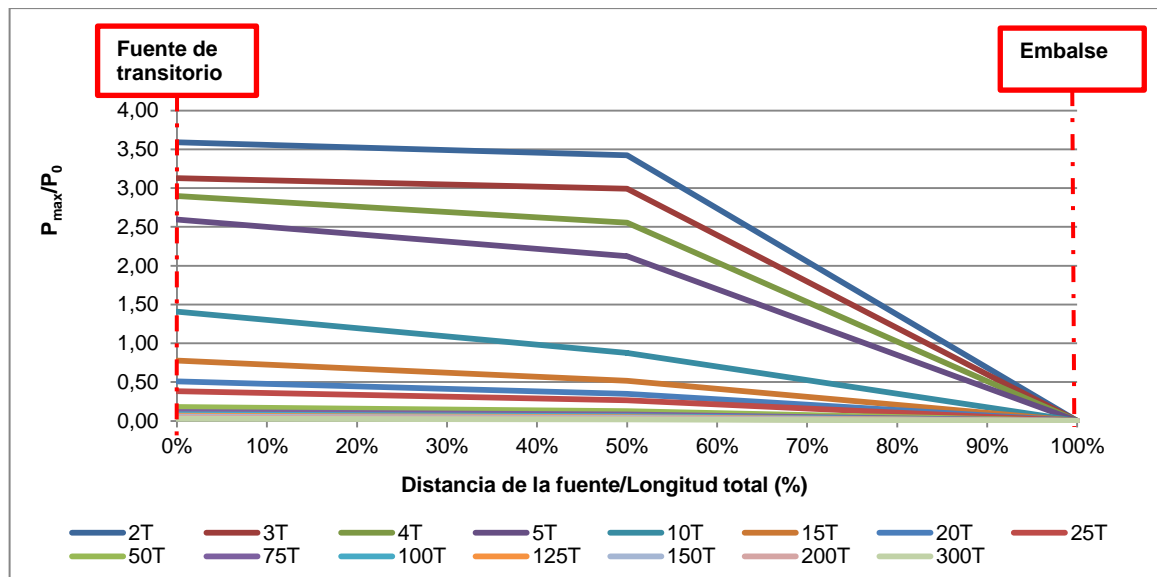
El punto de evaluación de la presión es la sección más cercana a la fuente del transitorio. Para llegar a esta conclusión se emplearon los resultados obtenidos para la red de la figura 6.1, con el fin de identificar la sección con las mayores variaciones de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).

En las figuras 6.5 y 6.6 se observa una disminución de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática, a medida que el cálculo se realiza para una sección más alejada de la válvula.

**Figura 6.5 Envoltorio de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática.
Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$**



**Figura 6.6 Envoltorio de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática.
Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 800$**



Así mismo, la relación entre la presión dinámica mínima y la presión estática aumenta a valores mayores o iguales a 1 conforme el cálculo se realiza a una mayor distancia de la válvula, como se aprecia en las figuras 6.7 y 6.8.

Figura 6.7 Envolvente de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 1 \text{ m/s}$. $L/D = 400$

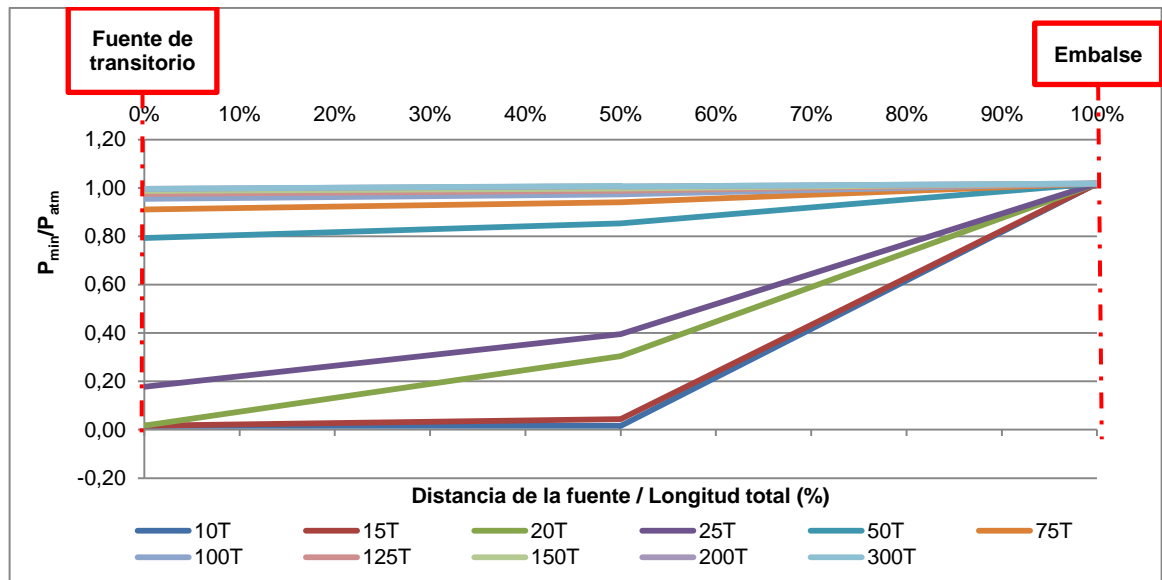
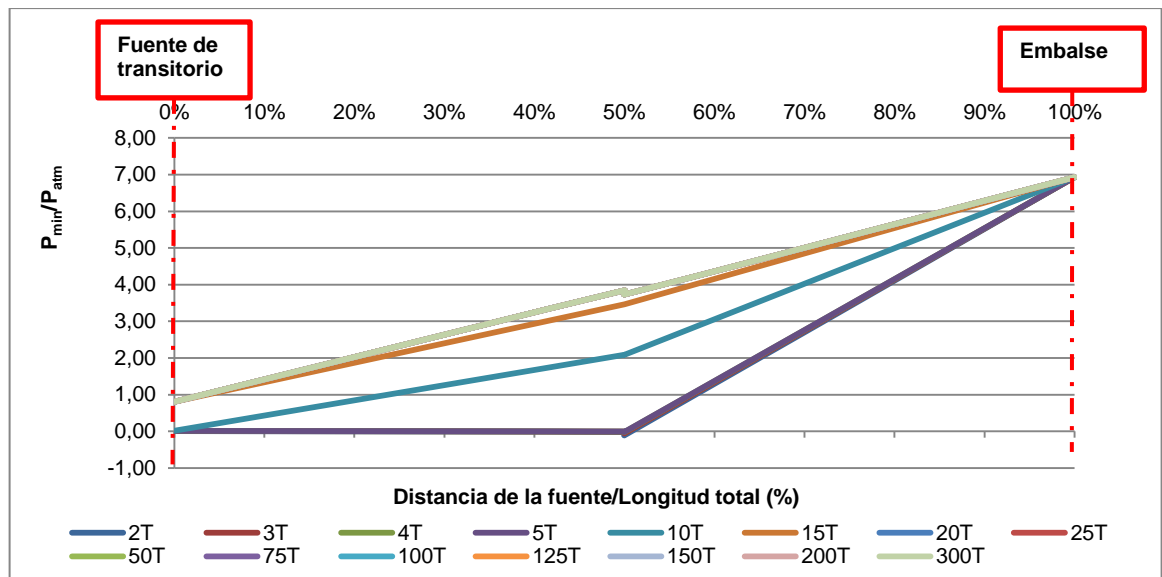


Figura 6.8 Envolvente de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 6 \text{ m/s}$. $L/D = 800$



6.8. Esquema de la simulación propuesta

En la tabla 6.7 se presenta el resumen de las variables que se utilizaron para el análisis de sensibilidad, cada combinación representa una simulación. Teniendo en cuenta que el número de simulaciones posibles es muy grande (23.040) se hizo una reducción adicional del rango de cada variable, considerando las conclusiones obtenidas con las variables analizadas previamente.

Tabla 6.7 Resumen de variables utilizadas en el análisis de sensibilidad

Tiempo de maniobra N x T (s)	Velocidad de flujo (m/s)	Diámetro (pulgadas)	L/D	Material	Topología	Relación $\frac{L_1}{D_1}$ $\frac{L_2}{D_2}$ $\frac{L_3}{D_3}$	Válvula	Maniobra
1T	1,0	3	400	PVC	Bifurcación	1	Compuerta	Cierre
2T	2,0	4	800		Trifurcación	2	Mariposa	
3T	3,0	6	1500			4		
4T	4,0	12	2500					
5T	5,0	20						
10T	6,0							
15T								
20T								
25T								
50T								
75T								
100T								
125T								
150T								
200T								
300T								

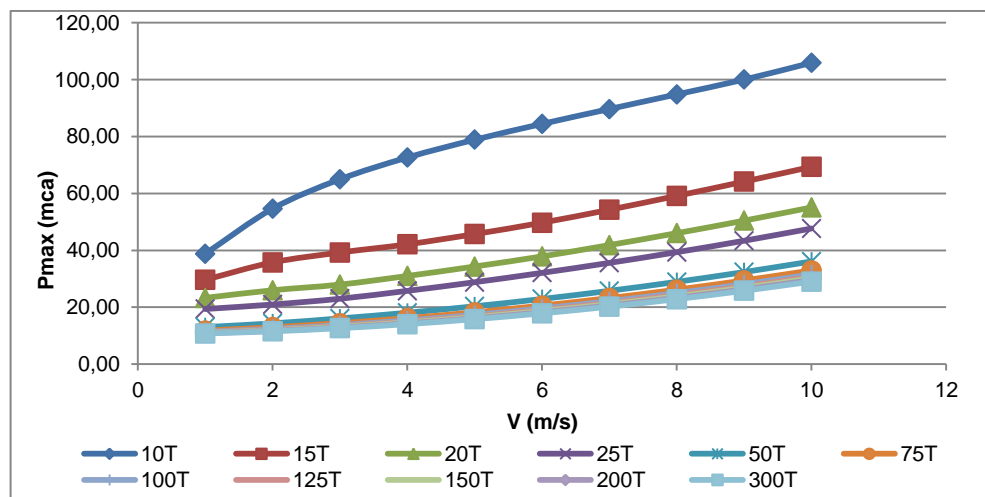
6.9. Presentación de resultados

En este documento se muestra gráficamente la información, se presenta de esta manera teniendo en cuenta la gran cantidad de datos obtenidos y como una forma didáctica de mostrar los resultados del análisis. Para definir las gráficas que se presentan en el capítulo Capítulo 7 se realizaron diferentes pruebas, las cuales permitieron definir como la más indicada a la curva de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática y

presión dinámica mínima - presión atmosférica vs. la variable que se utiliza para el análisis. Esta gráfica permite observar la influencia de cada elemento en la magnitud del fenómeno transitorio.

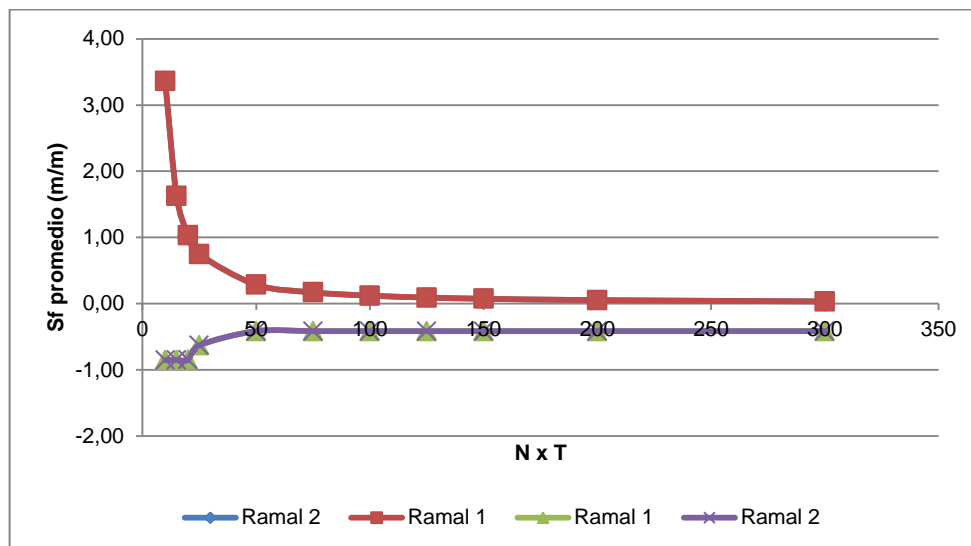
- Para el análisis, la primera gráfica que se probó fue presión máxima vs. variable modificada. Se encontró que no era adecuada, ya que no permitió identificar tendencias del comportamiento del fenómeno. Su forma tiende a ser una línea recta con pendiente positiva, que crece indefinidamente (figura 6.9).

Figura 6.9 Presión dinámica vs. variable empleada en el análisis



- La segunda figura que se revisó fue la pendiente máxima o mínima promedio de presión vs. la variable usada para el análisis. Esta pendiente corresponde a la inclinación de la línea que une el nivel en el embalse y el valor máximo o mínimo de la presión en la tubería. Esta opción se descartó porque la variabilidad para presiones negativas no permitió identificar claramente la influencia de las variables utilizadas en el análisis de sensibilidad de la relación entre la presión dinámica y la presión estática (figura 6.10).

Figura 6.10 Pendiente promedio vs. variable empleada en el análisis



- Finalmente, se encontró que la figura de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) vs. la variable empleada para el análisis sí permite observar los resultados, de tal forma que se pueden obtener conclusiones pertinentes, como se presenta en la figura 6.11.

Figura 6.11 Relación presión dinámica máxima - presión estática vs. variable empleada en el análisis

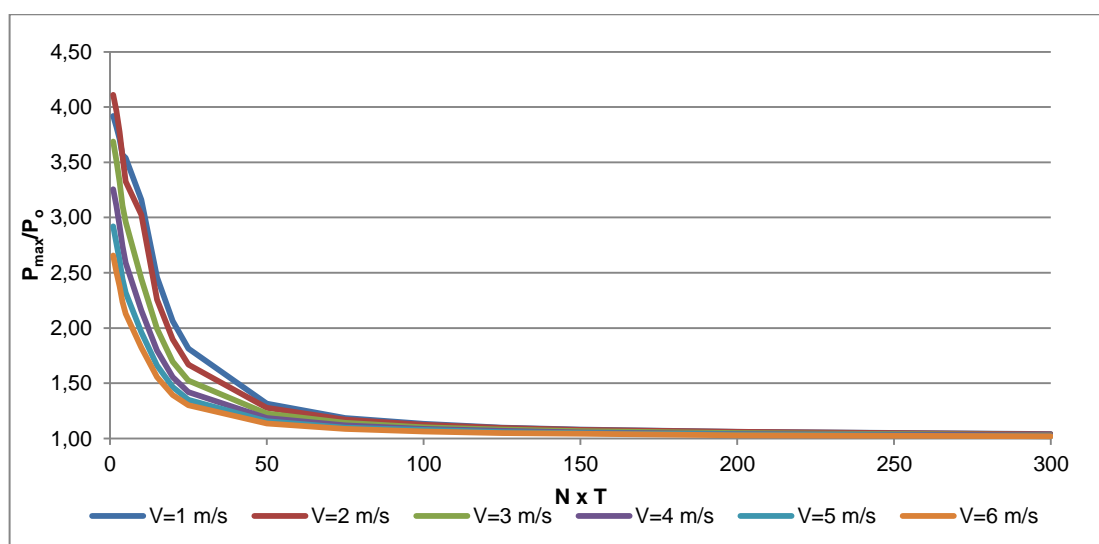
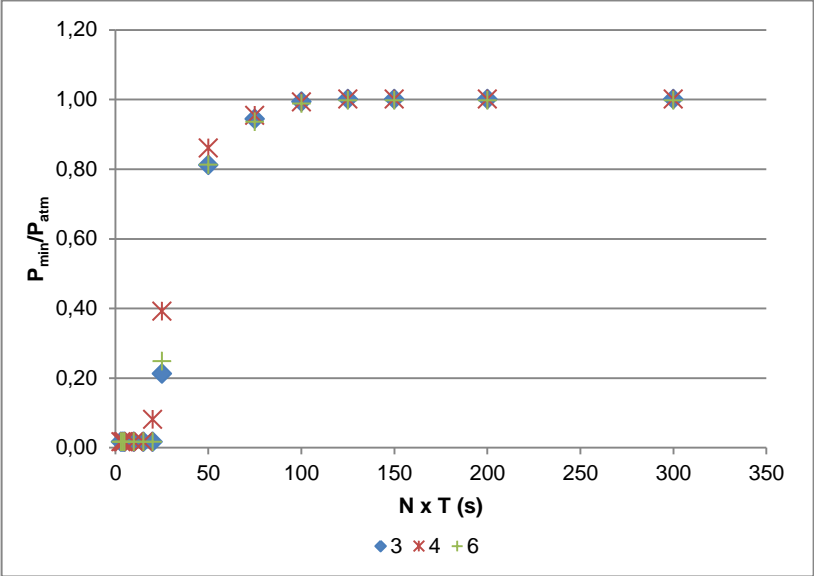


Figura 6.12 Relación presión dinámica mínima - presión atmosférica vs. variable empleada en el análisis.



Capítulo 7

Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones y el análisis de sensibilidad hecho a las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), a partir de las variables que se indican en el capítulo Capítulo 6 .

Los resultados de las relaciones indicadas que se presentan en este capítulo se estimaron con base en los datos de presión absoluta. El valor de la presión atmosférica empleado es de 10,33 m.c.a.

7.1. Bifurcación y válvula de compuerta

La primera configuración que se analizó corresponde a la tipología de bifurcación con válvulas de compuerta. En el Anexo A se presentan los resultados obtenidos de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) para esta configuración.

7.1.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de maniobra.

La primera variable que se empleó para el análisis de sensibilidad fue el tiempo de cierre, a sabiendas de que aporta el mayor número de combinaciones, como se indicó en el numeral 6.8. Adicionalmente, es importante en la magnitud del fenómeno transitorio, como se manifestó en la etapa de revisión bibliográfica (numeral 4.1.3).

Los tiempos de cierre empleados se estimaron como el periodo de la tubería (T) por el número de sus repeticiones (N), que se desea analizar (N x T).

- **Para la presión máxima**

Se identificó un tiempo de cierre para el cual la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{\text{máx}}/P_0$) es cercano a 1 y su variación no es significativa, ya que la diferencia del valor obtenido en una simulación, respecto de otra con un cierre más lento, es despreciable. En las figuras 7.1 y 7.2 se presentan los resultados de dos simulaciones que permiten identificar este tiempo de cierre en 75 T (150 L/a).

Figura 7.1 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$. Diámetros de 3, 4 y 6"

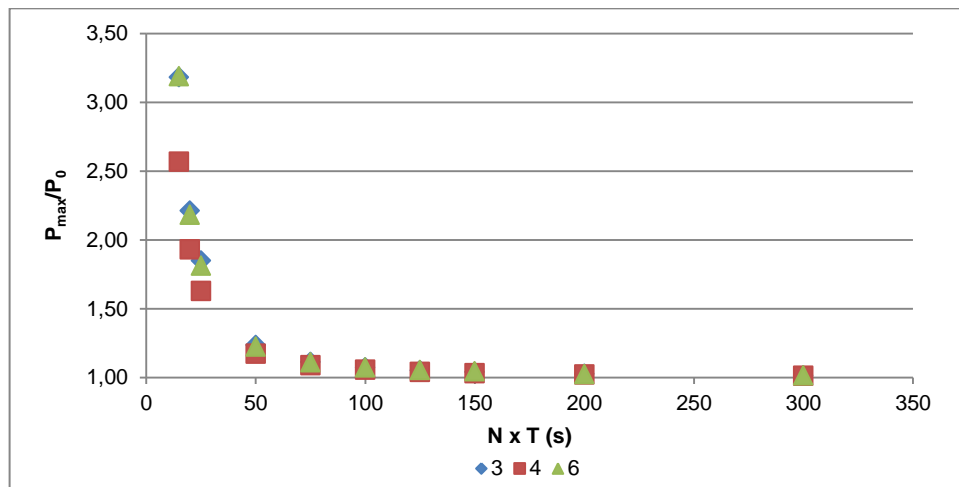
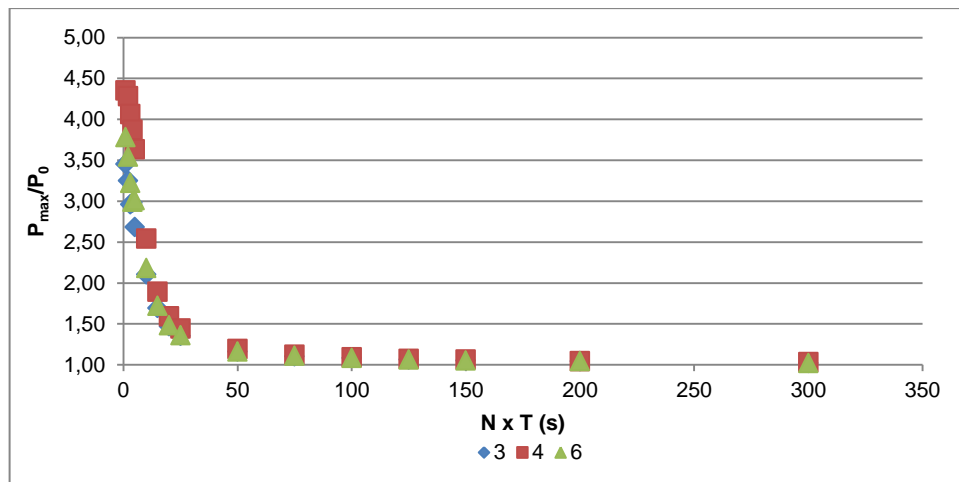


Figura 7.2 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6"



Para confirmar esta primera hipótesis, en las figuras 7.3, 7.4 y 7.5 se comparan los resultados de múltiples simulaciones con la misma velocidad, diámetro y diferentes relaciones L/D. Los valores de presión dinámica y estática se presentan en términos absolutos, es decir, incluyen la presión atmosférica. A partir de esta información, para tuberías de PVC se confirma lo siguiente:

- En general, con cierres superiores a 75T (150 L/a) la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática (P_{\max}/P_o) tienden a un valor mínimo cercano a 1, no mayor a 1,20. Por lo tanto, si se adoptan tiempos de cierre mayores o iguales a 75T (150 L/a), en redes con tuberías de PVC, la sobrepresión puede adoptarse como el 20% de la presión estática.
- Para tiempos de cierre superiores a 75T (150 L/a) la magnitud del fenómeno transitorio depende únicamente del tiempo de la maniobra, ya que se obtienen valores similares de la relación presión dinámica máxima - presión estática con diferentes valores de las variables velocidad en condición permanente, longitud, diámetro y relación L/D, en tuberías en PVC.

Figura 7.3 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. D =3". V = 1 m/s

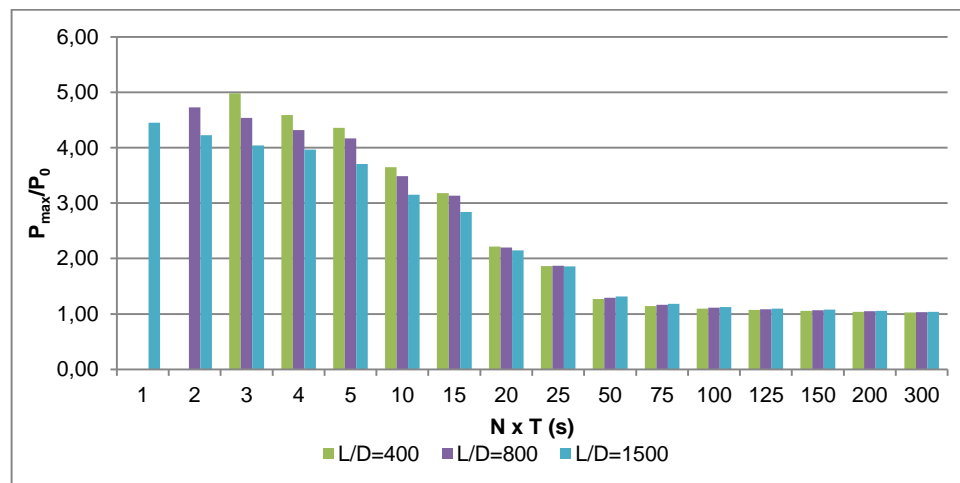


Figura 7.4 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. D = 4". V = 4 m/s

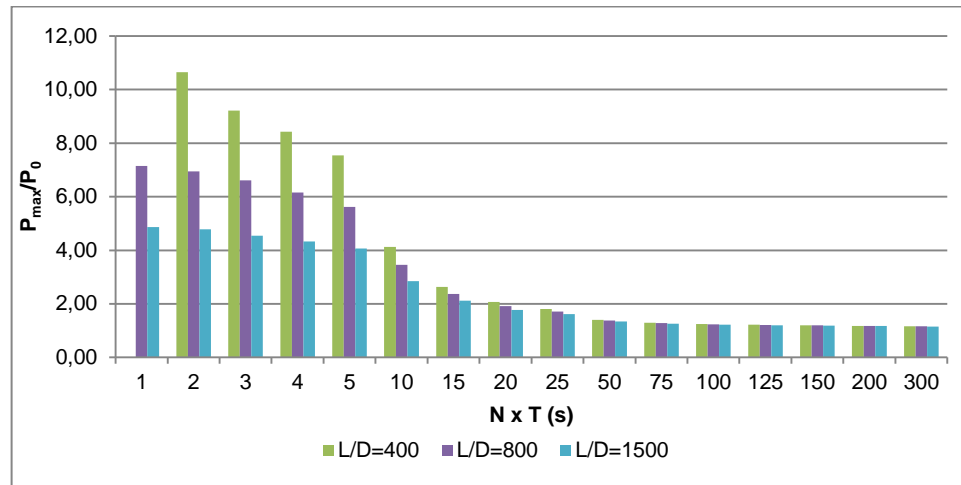
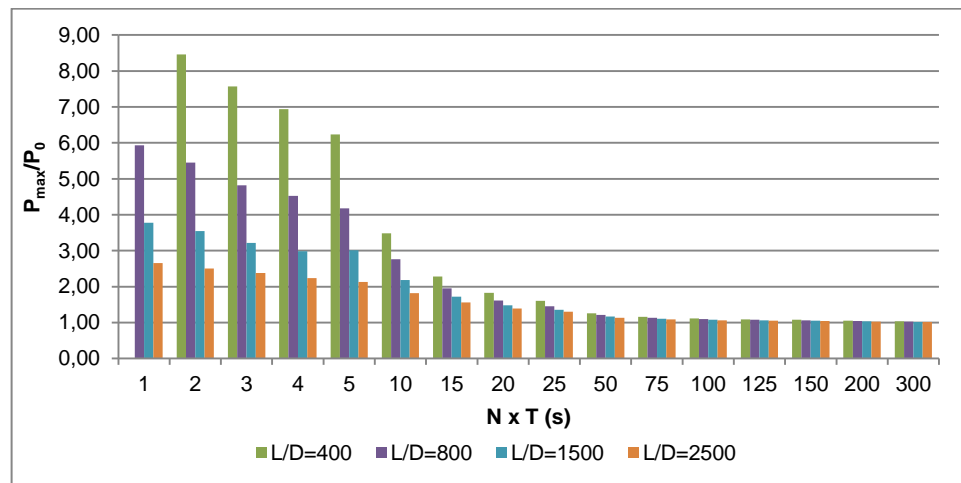


Figura 7.5 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. D = 6". V = 6 m/s



- **Para la presión mínima**

Se identificó un tiempo de cierre a partir del cual la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{min}/P_{atm}) alcanza un valor constante cercano a 1. De acuerdo con las simulaciones realizadas, el tiempo de cierre para el cual se obtiene este valor depende de la velocidad que tenga el flujo en condiciones permanentes. Para el escenario correspondiente a la figura 7.6 esta condición se logra con un cierre de 100 T (200 L/a), mientras que para el evento que se muestra en la figura 7.7 se obtiene con tiempo de 10T

(20 L/a). Además, se observa que se produce la separación de la columna líquida para un rango de valores de tiempos de cierre, puesto que los valores de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{\text{min}}/P_{\text{atm}}$) son aproximadamente 0,017.

Figura 7.6 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 400$. Diámetros de 3, 4 y 6"

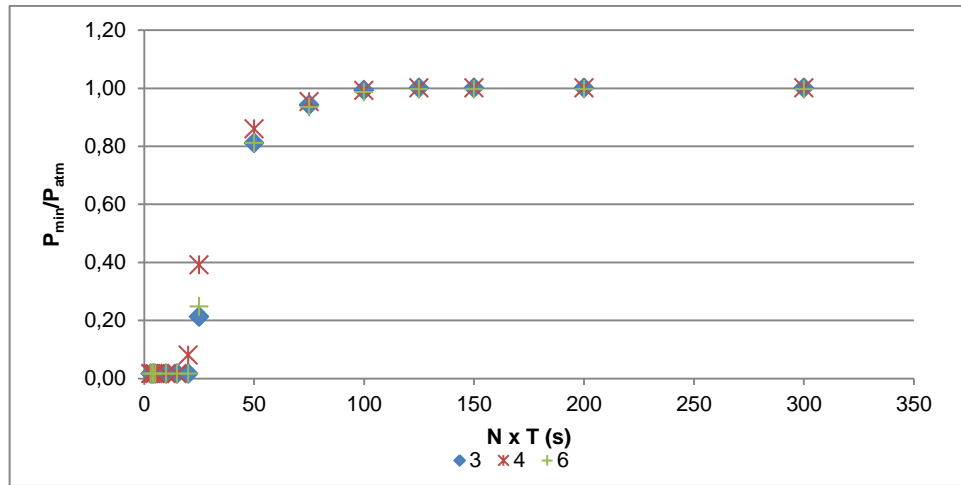
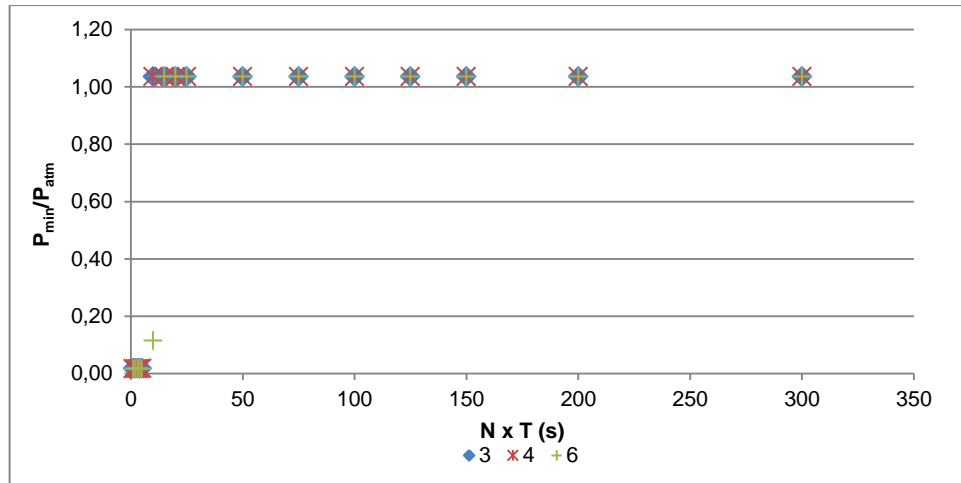


Figura 7.7 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6"



Para confirmar esta hipótesis, en las figuras 7.8, 7.9 y 7.10 se comparan los resultados de múltiples simulaciones con la misma velocidad, diámetro y diferentes relaciones L/D . A partir de esta información, se concluye lo siguiente para tuberías de PVC:

- En general, con cierres superiores a 75T (150 L/a) la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{\text{mín}}/P_{\text{atm}}$) tienden a un valor mínimo cercano a 1. Por lo tanto, empleando tiempos de cierre mayores o iguales a 75 (150 L/a), en redes con tuberías de PVC, se asegura que la presión mínima en la tubería sea igual o mayor a 10,33 m.c.a.
- Se identificó que el tiempo para el cual la relación presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{\text{mín}}/P_{\text{atm}}$) alcanzan un valor constante depende de la velocidad en condiciones permanentes y de la relación longitud - diámetro (L/D), los cuales se muestran en la tabla 7.1.
- Se observó que existen tiempos de cierre para los cuales se presenta separación de columna, es decir, que se obtienen valores de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{\text{mín}}/P_{\text{atm}}$) cercanas a 0,017. Estos tiempos de maniobra dependen de la velocidad en condiciones permanentes y de la relación longitud - diámetro (L/D), los cuales se muestran en la tabla 7.2. Empleando tiempos de cierre mayores a 75T (150L/a) se garantiza que no se presente separación de columna.
- De acuerdo con los datos de las tablas 7.1 y 7.2 el caso más crítico, es decir, aquel escenario que requiere un tiempo de cierre mayor para garantizar que la presión sea como mínimo la presión atmosférica, corresponde a la velocidad más baja en combinación con la relación L/D más pequeña. Esto se debe a que el nivel requerido en el embalse para generar velocidades altas es tan grande que la reducción de presión no alcanza a bajar hasta el valor de la presión atmosférica, aun cuando la diferencia entre la presión estática y la depresión sea mayor.

Figura 7.8 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 3". V = 1 m/s

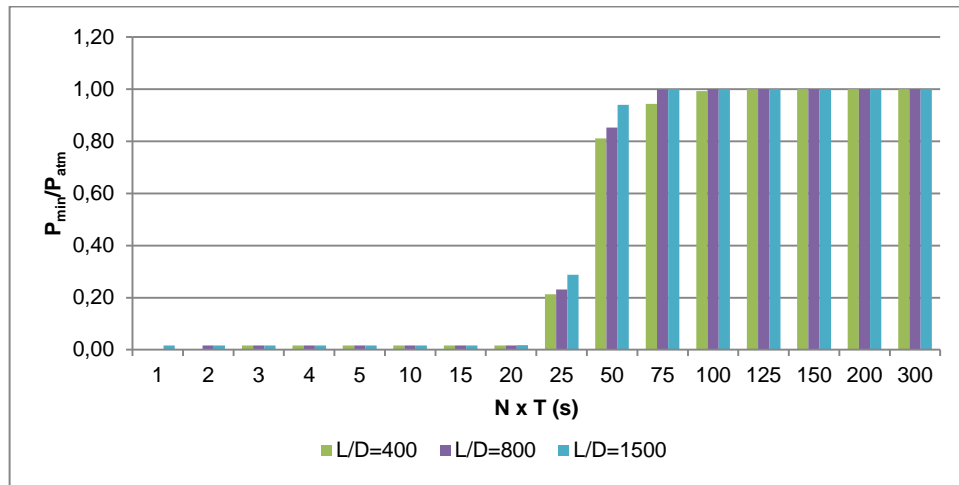


Figura 7.9 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 4". V = 4 m/s

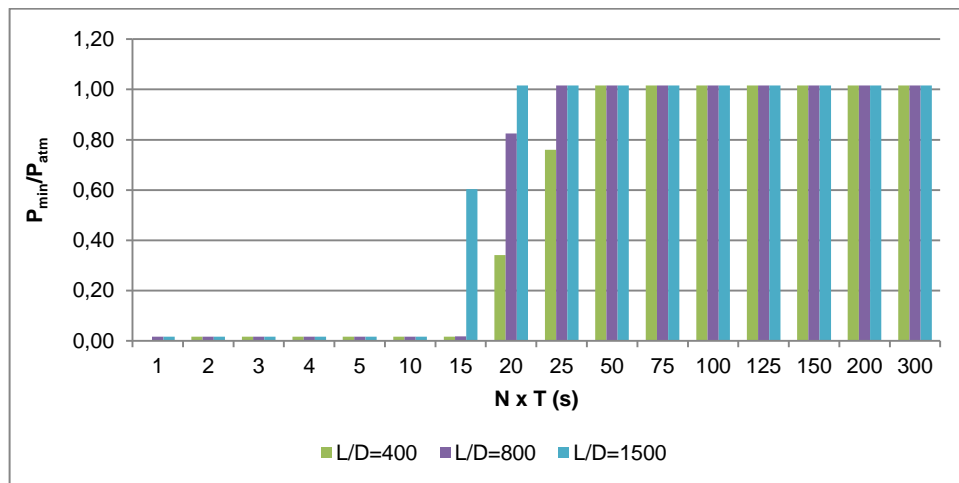


Figura 7.10 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 6". V = 6 m/s

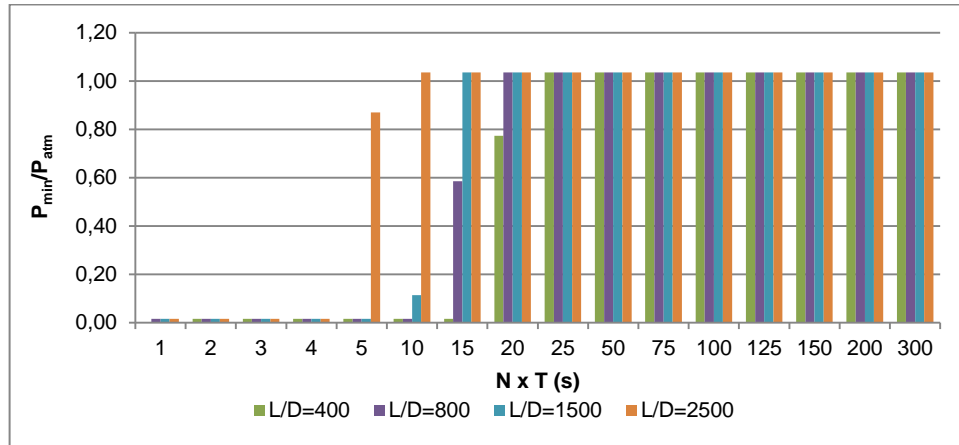


Tabla 7.1 Tiempos de maniobra a partir del cual la presión mínima dinámica es constante.

Velocidad (m/s)	Relación L/D			
	400	800	1500	2500
1	75T	75T	75T	50T
2	75T	50T	50T	25T
3	50T	50T	25T	20T
4	50T	25T	20T	15T
5	25T	20T	15T	10T
6	25T	20T	15T	10T

Tabla 7.2 Tiempos de maniobra hasta los cuales se presenta separación de columna.

Velocidad (m/s)	Relación L/D			
	400	800	1500	2500
1	20T	20T	15T	15T
2	20T	20T	15T	15T
3	20T	20T	15T	15T
4	15T	15T	10T	5T
5	15T	15T	10T	5T
6	15T	10T	5T	4T

- **Selección del número de tiempos de cierre**

Para reducir el número de simulaciones que se deben realizar se analizaron los tiempos de cierre menores a 75T (150 L/a), teniendo en cuenta las conclusiones de los ítems anteriores. Se encontró que si se utilizan los datos correspondientes a 1, 15, 25 y 75T se puede obtener una curva muy parecida a la que se elaboró con los tiempos de cierre inicialmente planteados, como se muestra en las figuras 7.11 y 7.12.

Figura 7.11 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvula de compuerta. $V = 1$ m/s. $L/D = 100$. Diámetros de 3, 4 y 6". $t < 75T$

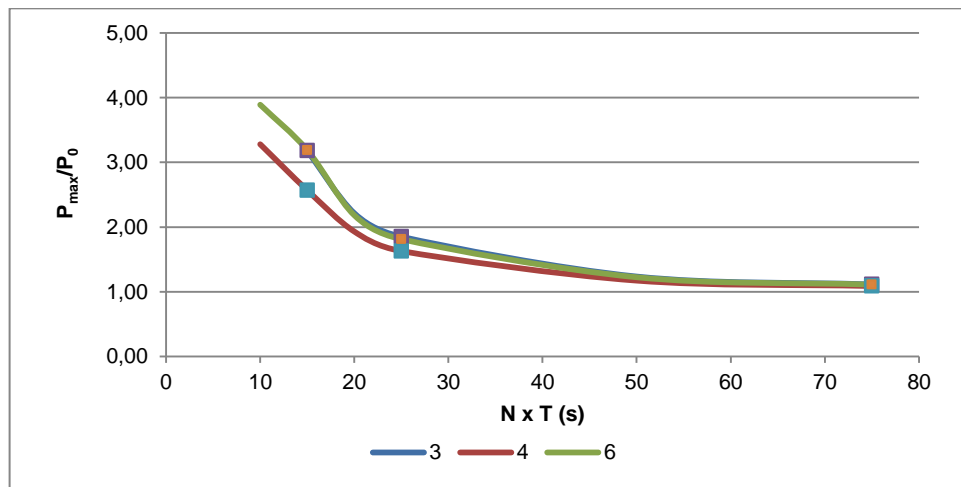
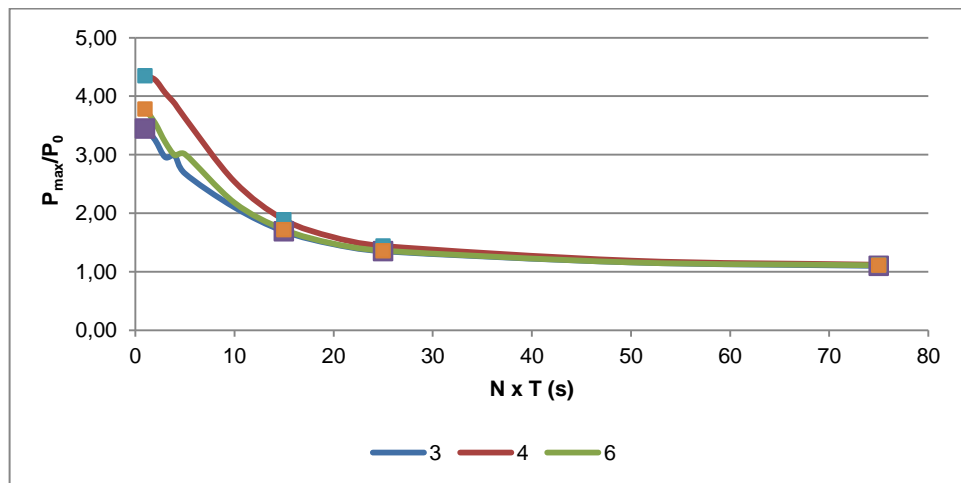


Figura 7.12 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 6$ m/s. $L/D = 1500$. Diámetros de 3, 4 y 6". $t < 75T$



Por lo tanto, para las simulaciones posteriores (sin incluir el estudio de velocidad y relación L/D de la configuración bifurcación y válvula de compuerta) se emplearon los tiempos de cierre indicados en la tabla 7.3.

Tabla 7.3 Tiempos de cierre que se deben emplear para el estudio de sensibilidad a la presión relativa, modificando otras variables

Tiempo de maniobra N x T (s)
1T
15T
25T
75T

- **Recomendación fundamental sobre el tiempo de cierre**

Para la operación de cierre en una red abierta a presión en tubería PVC y válvulas de compuerta, se recomienda que el tiempo de maniobra sea mayor o igual a 75T (150 L/a). Con este tiempo se garantiza que la máxima presión dinámica no sea mayor al 20% de la presión estática, ni la presión mínima sea menor que la presión atmosférica.

7.1.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.

Se verificó el comportamiento del sistema en flujo transitorio con velocidades entre 1 y 6 m/s para cada uno de los tiempos de cierre definidos en la tabla 6.1, y se encontró lo siguiente:

- **Para la presión máxima**

El mayor aumento de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) no se presenta con la simulación que tiene máxima velocidad de flujo en condiciones permanentes. Se identificó que el máximo de la relación presión dinámica máxima -

presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) se produce cuando la velocidad está entre 2 y 4 m/s, como se muestra en las figuras 7.13 y 7.14. Esto se debe a que el nivel requerido en el embalse para generar velocidades altas es tan grande que la proporción del aumento de presión es menor, aun cuando el valor neto de presión estimado sea mayor. Adicionalmente, se concluye que la velocidad es un factor determinante en el aumento de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), para tiempos de cierre menores a 50T (100L/a), mientras que para tiempos mayores a 75T (150 L/a) la velocidad que el flujo tenga en condiciones permanentes no afecta significativamente el valor de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$, ya que las curvas tienden a ser planas.

Figura 7.13 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. L/D = 400. D = 3"

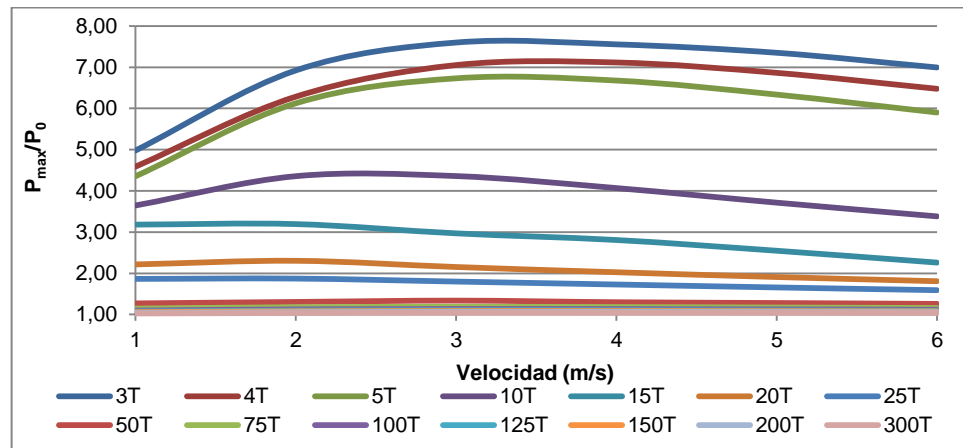
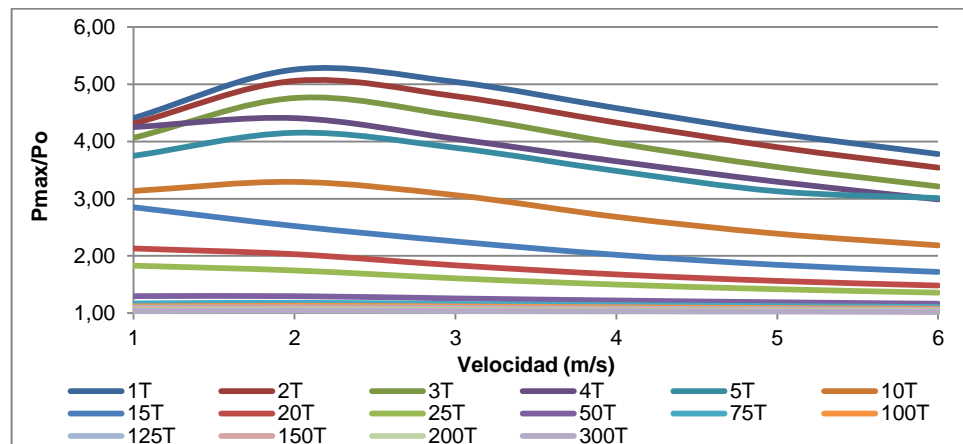


Figura 7.14 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. L/D = 1500. Diámetros de 6"



- **Para la presión mínima**

Como complemento a lo expresado en el numeral 7.1.1. y de acuerdo con lo mostrado en la las figuras 7.15 y 7.16 se confirma que:

- En general, con tiempos de maniobra superiores a 75T (150 L/a) la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{\text{mín}}/P_{\text{atm}}$) tienden a un valor mínimo cercano a 1, para tuberías de PVC con velocidades de flujo entre 1 y 6 m/s.

Figura 7.15 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. L/D = 400. D = 3"

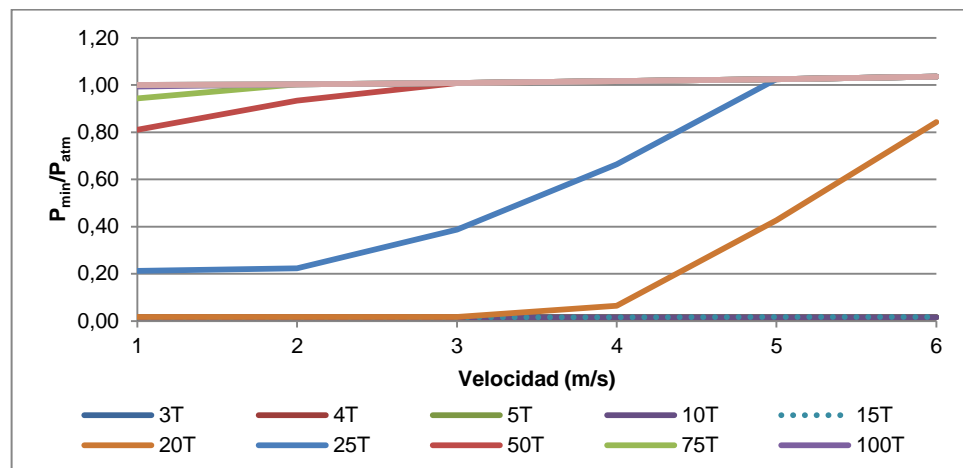
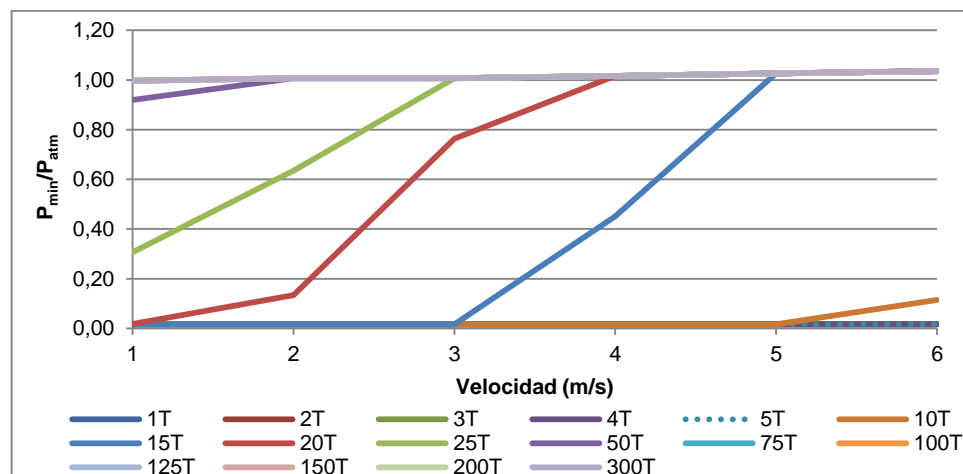


Figura 7.16 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. L/D = 1500. D = 6"



De acuerdo con lo anterior, se recomienda emplear un tiempo de maniobra mayor o igual a 75T (150 L/a), de tal forma que la velocidad del flujo en condición permanente no influya en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).

- **Reducción del rango de velocidades que se deben utilizar para el cálculo del transitorio**

Para reducir el número de simulaciones que se deben realizar se consideró adecuado concentrar los esfuerzos en los valores de 2, 3 y 4 m/s, ya que para estas velocidades se presentan los mayores valores de la relación entre la presión dinámica máxima y la estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$).

7.1.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro de la tubería.

No se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y el valor de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) para tiempos de maniobra mayores o iguales a 15T (30L/a), ya que no existen diferencias importantes entre los valores obtenidos para diámetros entre 3 y 20". Esto se evidencia en la tendencia de los datos a formar una línea recta horizontal, para los diferentes tiempos de cierre y condiciones señaladas en las figuras 7.17 y 7.18. En el caso de los cierres instantáneos, es decir, que $t = 1T$, se observa una variación de los valores de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ en función del diámetro de la tubería.

Figura 7.17 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. L/D = 400. V = 2 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T

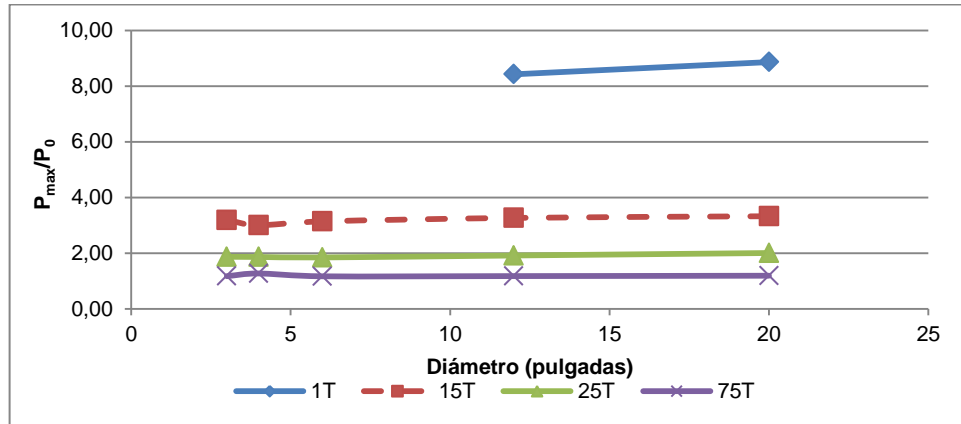
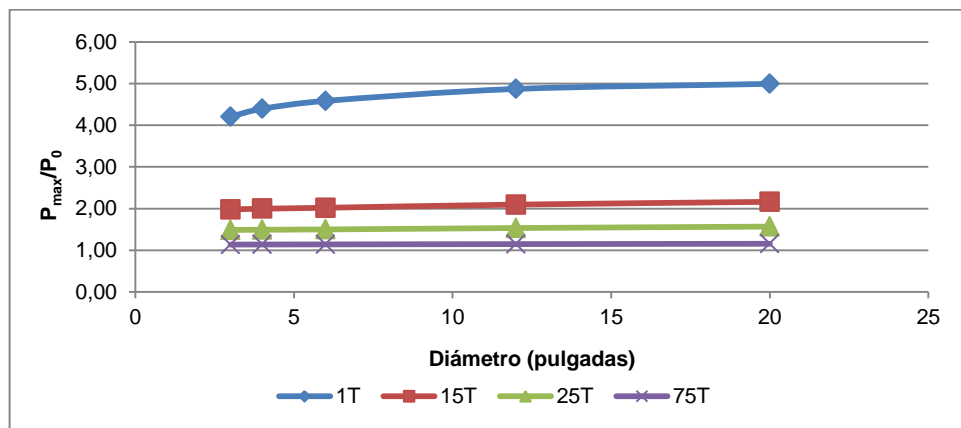


Figura 7.18 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. L/D = 1500. V = 4 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T



Adicionalmente, no se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y relación presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{min}/P_{atm}) considerando la tendencia de las figuras 7.19 y 7.20 en formar líneas rectas horizontales.

Figura 7.19 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. L/D = 400. V = 2 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T

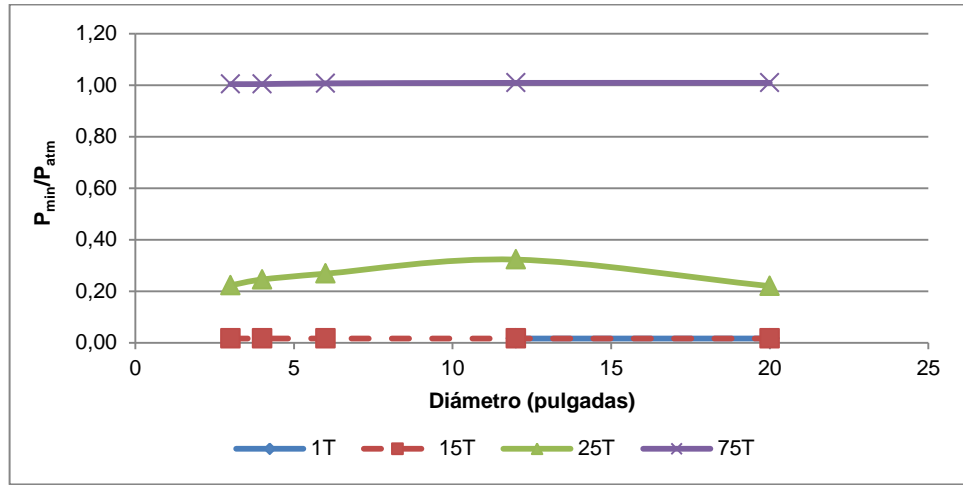
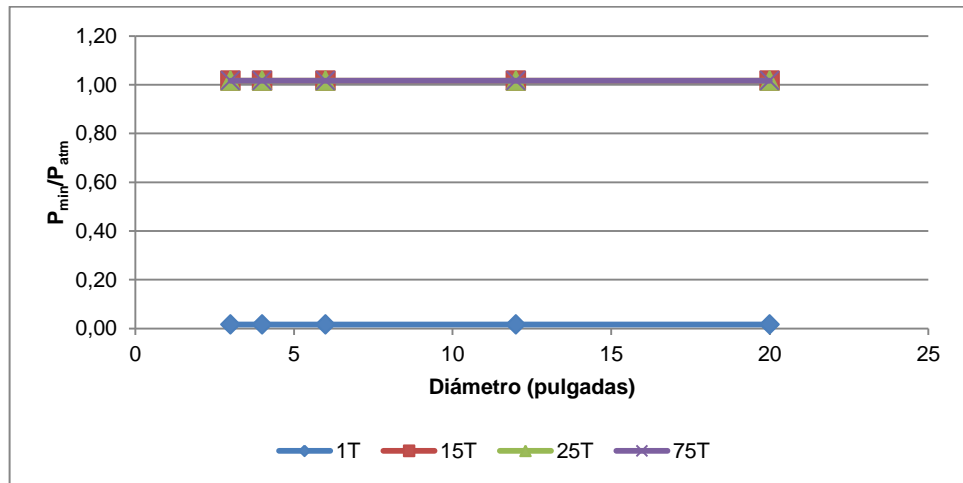


Figura 7.20 Variación de la relación presión dinámica mínima – presión atmosférica. Válvulas de compuerta. L/D = 2500. V = 4 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T



7.1.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D.

Para analizar en términos relativos la influencia de la longitud de las tuberías se empleó la relación longitud-diámetro, y se encontró lo siguiente:

- Para a la presión máxima

La magnitud de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) varía de forma inversa en función de la relación L/D, es decir, se presenta una disminución de $P_{m\acute{a}x}/P_o$ conforme se aumenta el valor de L/D, para tiempos de maniobra menores a 25T (50L/a). Mientras que para maniobras con tiempos de cierre mayores o iguales a 25T (150 L/a) no se observa influencia de la relación L/D en los valores de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$), como se muestra en las figuras 7.21 y 7.22.

Figura 7.21 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. D = 6". V= 2 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T

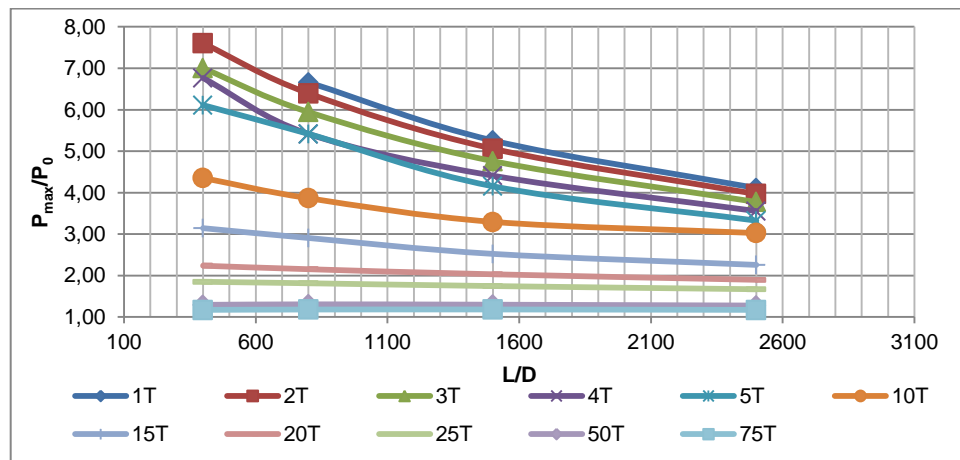
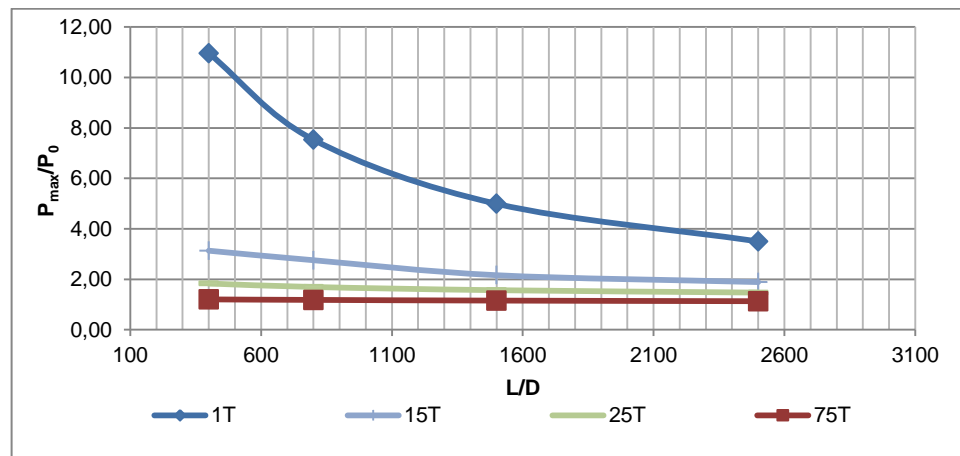


Figura 7.22 Variación de la relación presión dinámica máxima – presión estática. Válvulas de compuerta. D = 20". V = 4 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T



De acuerdo con las figuras 7.21 y 7.22, si la relación L/D es mayor o igual a 2500 la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) tiende a un valor mínimo que depende, en principio, de la velocidad, el tiempo de la maniobra y el diámetro. En este caso no se encontró un valor único que pueda definirse como tendencia de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$), ya que las diferentes combinaciones de las variables anteriormente citadas presentan diferentes valores mínimos.

- **Para la presión mínima**

Como complemento a lo expresado en el numeral 7.1.1. y de acuerdo con las figuras 7.23 y 7.24 se encontró que:

- En general, con tiempos de maniobra superiores a 75T (150 L/a) la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) tienden a un valor mínimo cercano a 1, para tuberías de PVC con relaciones L/D entre 400 y 2500. Por lo tanto, empleando tiempos de cierre mayores o iguales a 75 (150 L/a) se asegura que la presión mínima en la tubería sea igual o mayor a 10,33 m.c.a.

Figura 7.23 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 6". V = 2 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T

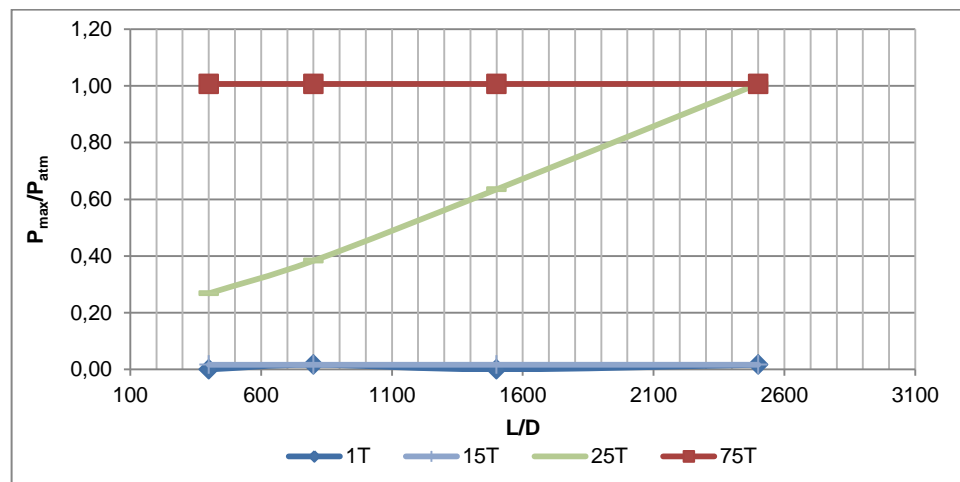
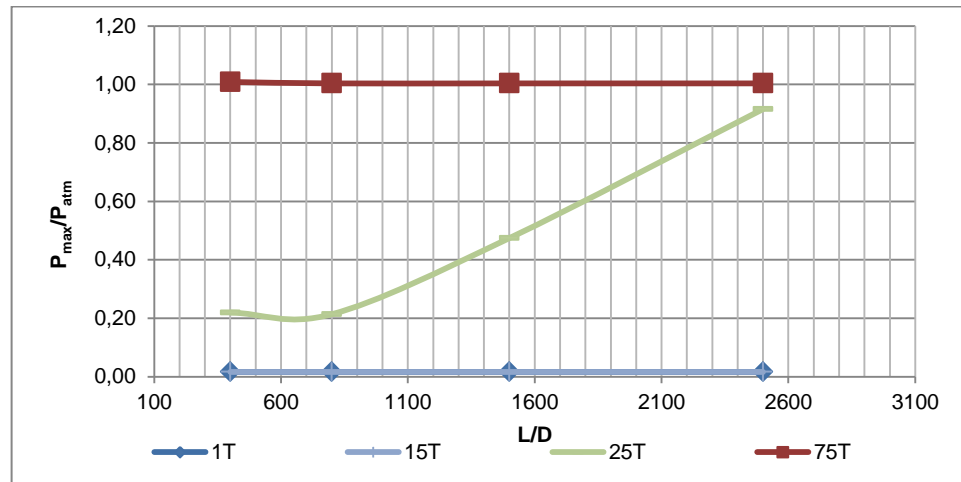


Figura 7.24 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. D = 20". V = 4 m/s. Tiempos de cierre 1, 15, 25 y 75T



7.1.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática (P_{max}/P_0) y presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{min}/P_{atm}) a la relación L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$).

De acuerdo con la información de las figuras 7.25 y 7.26 se concluye que la relación longitud-diámetro de la tubería principal y sus ramales no afecta significativamente el valor de las relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) cuando se emplea tiempos de cierre mayores o iguales a 25T ($50L/a$), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1=n L_i/D_i$) son muy similares.

Figura 7.25 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 2$ m/s. $L/D = 2500$ en la principal. $D = 6''$

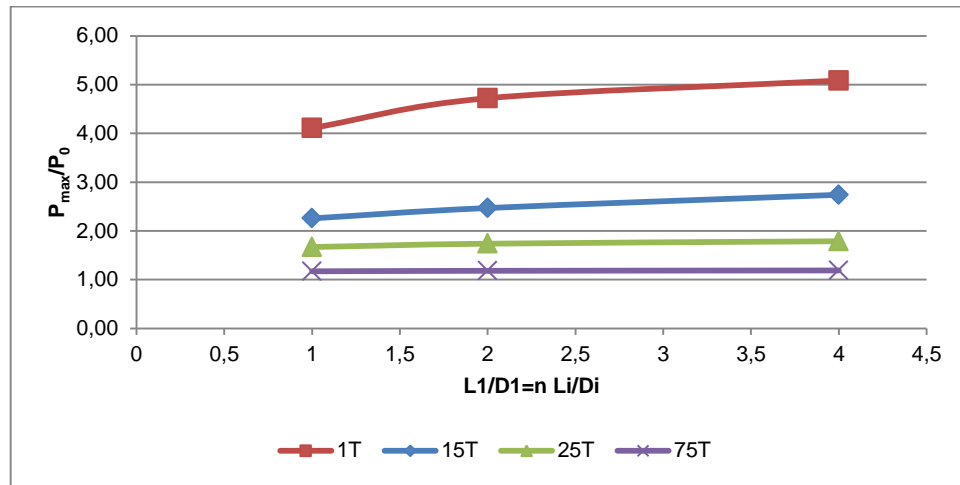
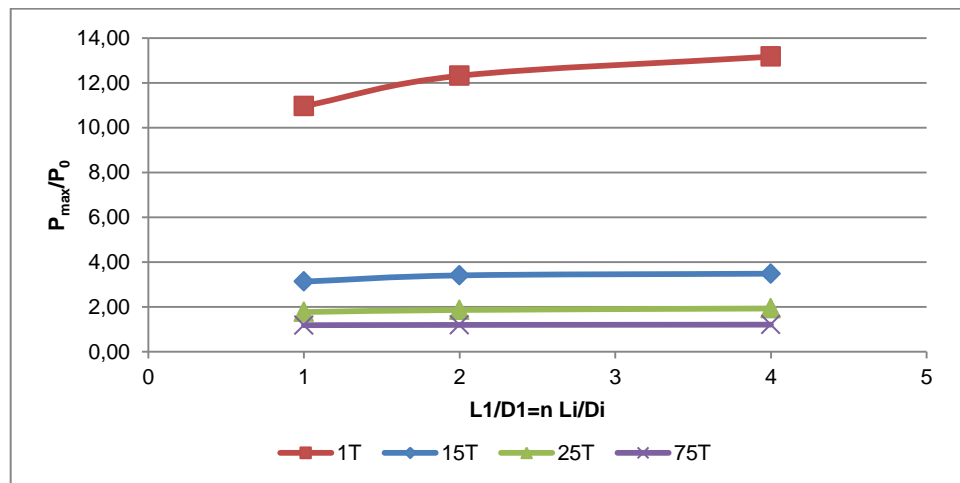


Figura 7.26 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $V = 4$ m/s. $L/D = 400$ en la principal. $D = 20''$



De acuerdo con la información de las figuras 7.27 y 7.28 se encontró que la relación longitud-diámetro de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) no afecta los valores de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{\min}/P_{atm}) para tiempos de maniobra menores o iguales a 15T ($30L/a$) y mayores o iguales a 75T ($150L/a$), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) son muy similares.

Figura 7.27 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 2 \text{ m/s}$. $L/D = 2500$ en la principal. $D = 6''$

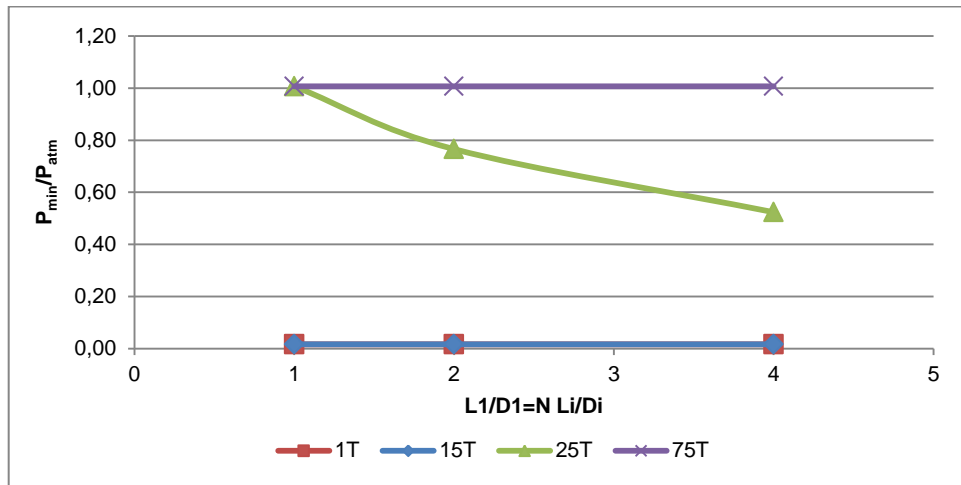
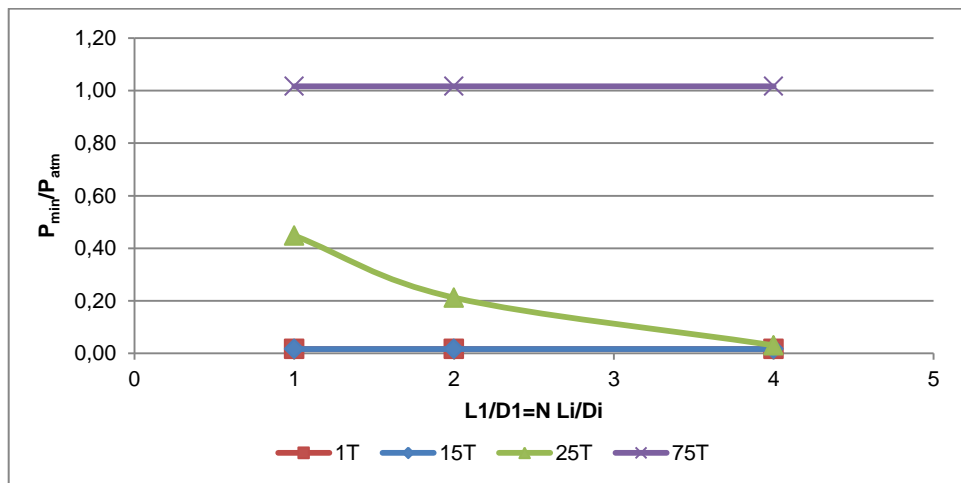


Figura 7.28 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvulas de compuerta. $V = 4 \text{ m/s}$. $L/D = 400$ en la principal. $D = 20''$



7.2. BIFURCACIÓN Y VÁLVULA DE MARIPOSA

La segunda configuración que se analizó corresponde a la tipología de bifurcación con válvulas de mariposa. En esta sección se comparan los resultados obtenidos con una válvula de mariposa y los que se presentaron en el numeral 7.1. , con válvula de compuerta. En el Anexo B se presentan los resultados obtenidos para esta configuración

de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).

7.2.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de maniobra.

En las figuras 7.29, 7.30, 7.31 y 7.32 se comparan los resultados obtenidos para los dos tipos de válvulas y diferentes tiempos de maniobra. A partir de esta información se encontró lo siguiente:

- Cuando se emplean válvulas de mariposa y se realizan cierres en tiempos iguales a 1T (2L/a) se presentan valores muy similares de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), a los estimados en sistemas con válvulas de compuerta para el mismo tiempo de cierre.
- Al emplear válvulas de mariposa y realizar cierres en tiempos mayores a 1T (2L/a) se presenta una reducción de los valores de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), en comparación con cierres hechos con válvulas de compuerta y la misma duración de la maniobra. Para las válvulas de mariposa se identificó que con un tiempo de cierre de 25T (50L/a) se obtiene el mismo efecto en la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) de cerrar en 75T (150L/a) con una válvula de compuerta, es decir, que la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ tiende a un valor cercano a 1, no mayor a 1,20. Por lo tanto, si se adoptan tiempos de cierre mayores o iguales a 25T (50 L/a) en redes con tuberías de PVC y válvulas de mariposa, la sobrepresión puede adoptarse como el 20% de la presión estática.
- Cuando se emplean válvulas de mariposa y se realizan cierres en tiempos mayores a 1T (2L/a) se presenta aumento de los valores de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), en comparación con cierres hechos con válvulas de compuerta y la misma duración de la maniobra. Para las válvulas de mariposa se identificó que con un tiempo de cierre de 15T (30L/a) se

obtiene el mismo efecto en la depresión que al cerrar en 75T (150L/a) con una válvula de compuerta, es decir, que la relación P_{\min}/P_{atm} tiende a un valor cercano a 1. Por lo tanto, con cierres superiores a 15T (30 L/a) en redes con tuberías de PVC y válvulas de mariposa, se asegura que la presión mínima en la tubería sea igual o mayor a 10,33 m.c.a.

Las diferencias que se presentaron en los valores de las relaciones P_{\max}/P_0 y P_{\min}/P_{atm} , entre los estimados para válvulas de mariposa y de compuerta, obedecen a que la reducción de los coeficientes de descarga es más lenta para la válvula de mariposa a partir de la apertura del 75%, como se mostró en la figura 4.12. Esto produce que la disminución del caudal desde la condición en flujo permanente a cero se produzca más lentamente cuando se emplean válvulas de mariposa, en comparación con válvulas de compuerta. En consecuencia, los valores de la relación presión dinámica máxima - presión estática (P_{\max}/P_0) producidos por el accionamiento de válvulas de mariposa son menores a los que se presentan con válvulas de compuerta para el mismo tiempo de cierre.

Figura 7.29 Variación de la relación presión dinámica máxima - hidrostática. $V = 4 \text{ m/s}$. $L/D = 800$. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$

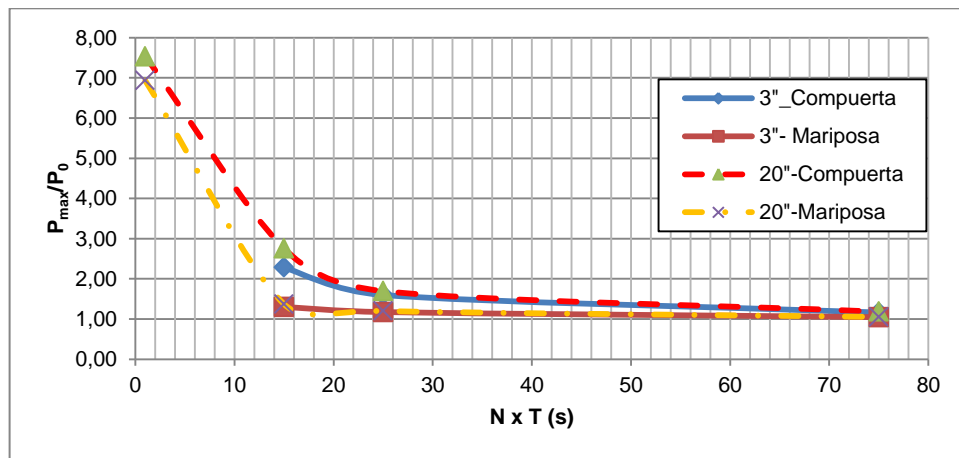


Figura 7.30 Variación de la relación presión dinámica máxima - hidrostática. $V = 2 \text{ m/s}$. $L/D = 2500$. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$

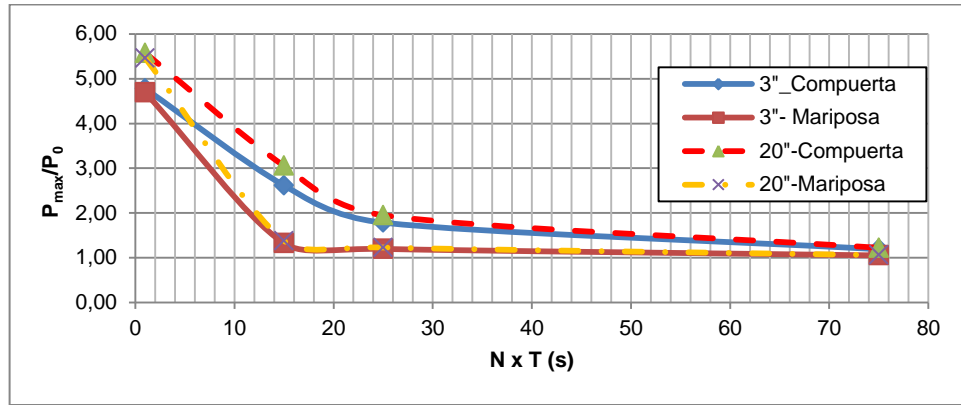


Figura 7.31 Variación de la relación presión dinámica mínima - hidrostática. $V = 4 \text{ m/s}$. $L/D = 800$. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$

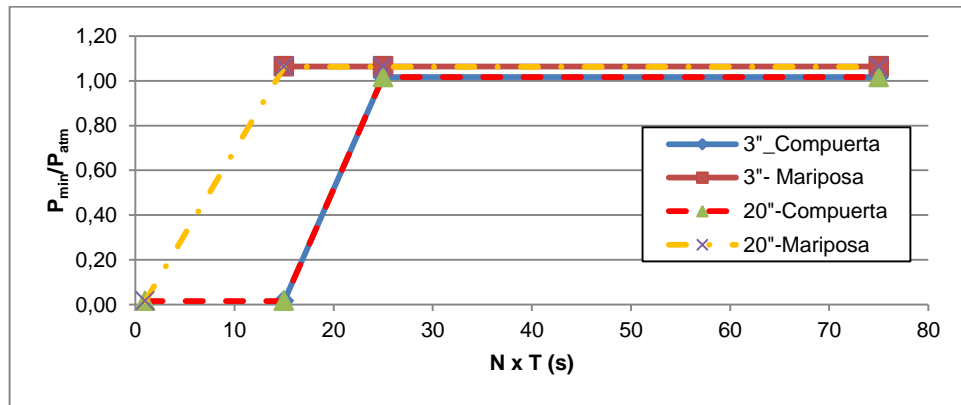
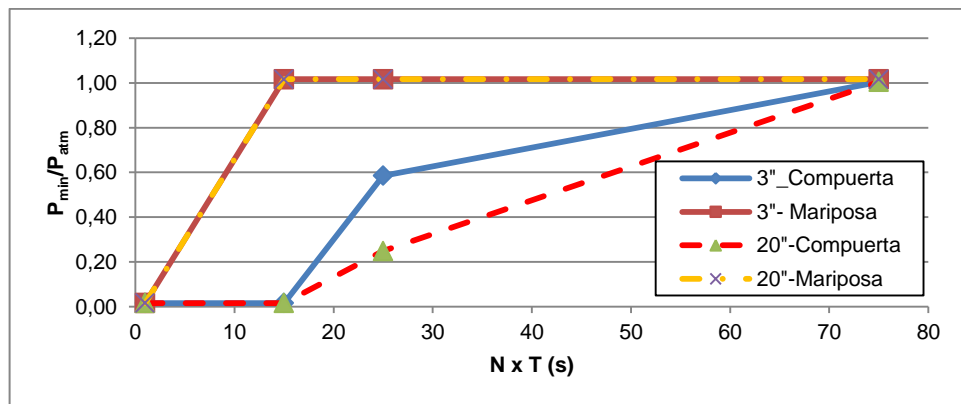


Figura 7.32 Variación de la relación presión dinámica mínima - hidrostática. $V = 2 \text{ m/s}$. $L/D = 2500$. Diámetros de 3 y 20". $t < 75T$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$



Para los dos tipos de válvula empleados en el análisis de sensibilidad se considera adecuado conservar el mismo tiempo de maniobra recomendado para una válvula de compuerta (75T), ya que con este tiempo de cierre se garantiza que la máxima presión dinámica no sea mayor al 20% de la presión estática ni la presión mínima sea menor que la presión atmosférica.

7.2.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.

En las figuras 7.33, 7.34, 7.35 y 7.36 se comparan los resultados obtenidos para los dos tipos de válvulas y diferentes velocidades. A partir de esta información se deduce lo siguiente:

- El comportamiento de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) es similar en los tipos de válvulas analizados. Sin embargo, se presentan diferencias entre los valores obtenidos para cada una en función de la velocidad en flujo permanente y el tiempo de maniobra, siendo más grandes los obtenidos para la válvula de compuerta. En la tabla 7.4 se presenta los rangos de la diferencia de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ para válvulas de mariposa, respecto de válvulas de compuerta.
- El comportamiento de la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) es muy similar en los tipos de válvulas analizados. Sin embargo, se detectaron diferencias importantes para 2 m/s y tiempos de cierre mayores a 1T (2L/a).

Figura 7.33 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. D = 6" L/D = 800. $L_1/D_1 = L_2/D_2$

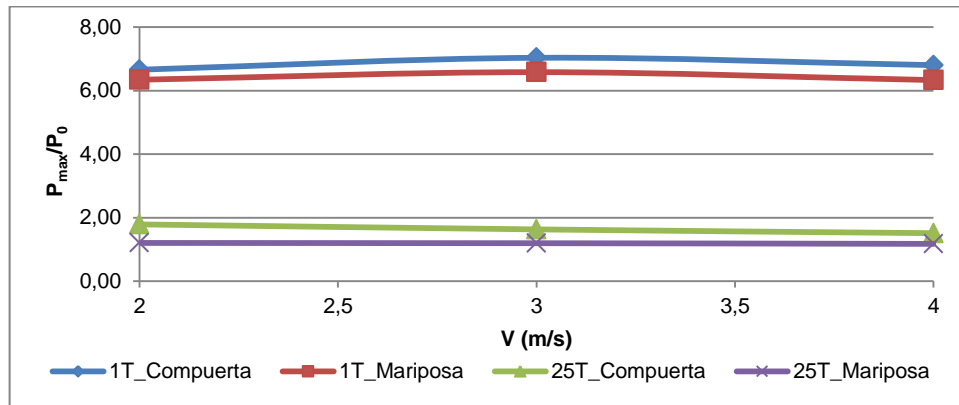


Figura 7.34 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. D = 20" L/D = 2500. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$

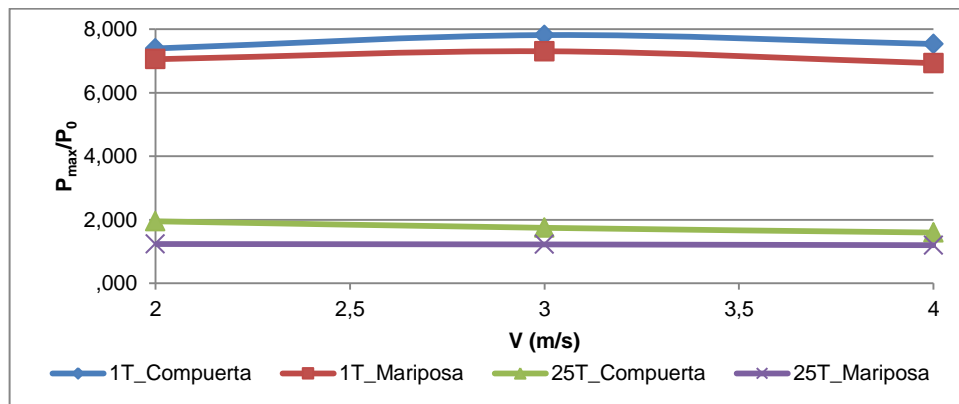


Figura 7.35 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. D = 6" L/D = 800. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$

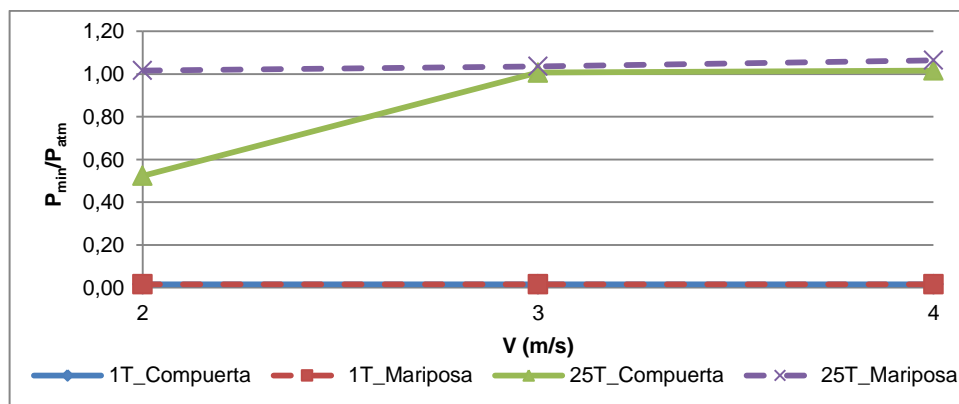


Figura 7.36 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. D = 20''
 $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$

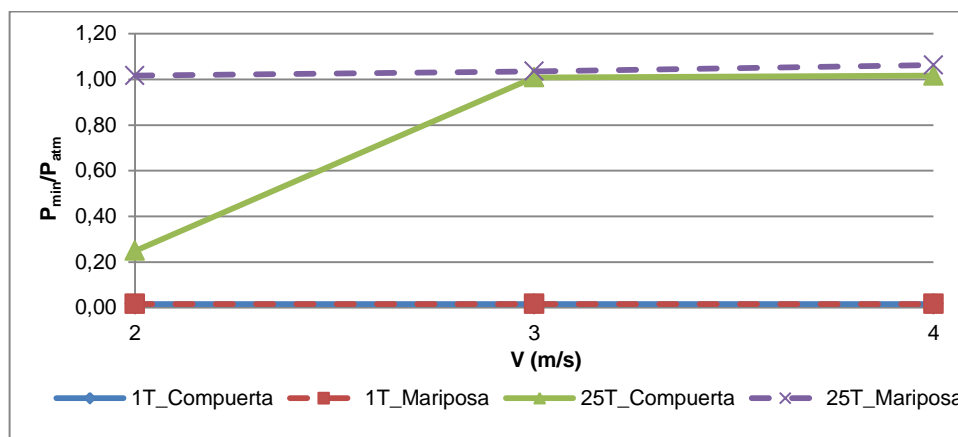


Tabla 7.4 Rangos de la diferencia de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ para válvulas de mariposa, respecto de válvulas de compuerta

Velocidad (m/s)	Tiempo de maniobra (N x T)			
	1	15	25	75
2	3 - 5%	43 - 56%	29 - 47%	0 - 13%
3	4 - 7%	38 - 56%	24 - 41%	9 - 12%
4	4 - 8%	33 - 51%	20 - 36%	7 - 10%

7.2.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro.

En las figuras 7.37, 7.38, 7.39 y 7.40 se comparan los resultados obtenidos para los dos tipos de válvulas y diferentes diámetros. Con base en esta información se deduce que el comportamiento de la relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la variación del diámetro de la tubería es similar en un sistema con válvula de mariposa o de compuerta. Por lo tanto, se deduce lo siguiente:

- No se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y el valor de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) para tiempos de

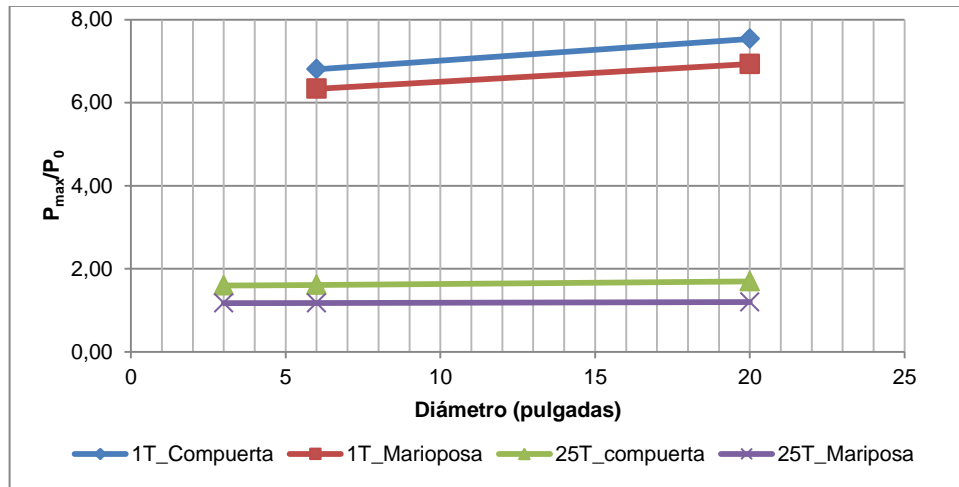
maniobra mayores o iguales a 15T (30L/a), ya que no existen diferencias importantes entre los valores obtenidos para diámetros entre 3 y 20", como se muestra en las figuras 7.37 y 7.38. En el caso de los cierres instantáneos, es decir, que $t = 1T$, se observa una variación de los valores de la relación P_{\max}/P_0 en función del diámetro de la tubería.

- Adicionalmente, no se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{\min}/P_{atm}) considerando la tendencia de las figuras 7.39 y 7.40 en forma de líneas rectas horizontales.

La diferencia que se observa en las figuras 7.37, 7.38, 7.39 y 7.40 entre los datos obtenidos para válvulas de mariposa y compuerta obedecen al tiempo de cierre. Esto se explica en detalle en el numeral 7.2.1.

Figura 7.37 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 4 \text{ m/s}$.

$$L/D = 800. L_1/D_1 = L_2/D_2$$



**Figura 7.38 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s.
 $L/D = 25000$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$**

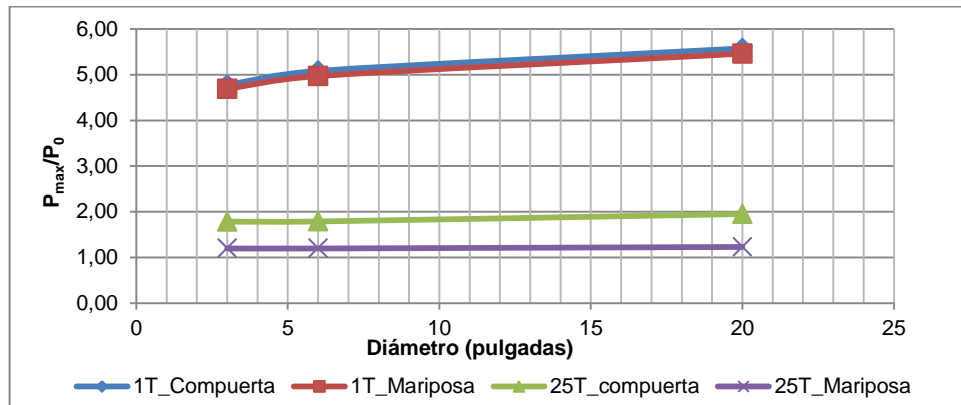


Figura 7.39 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 4$ m/s. $L/D = 800$. $L_1/D_1 = 1 L_2/D_2$

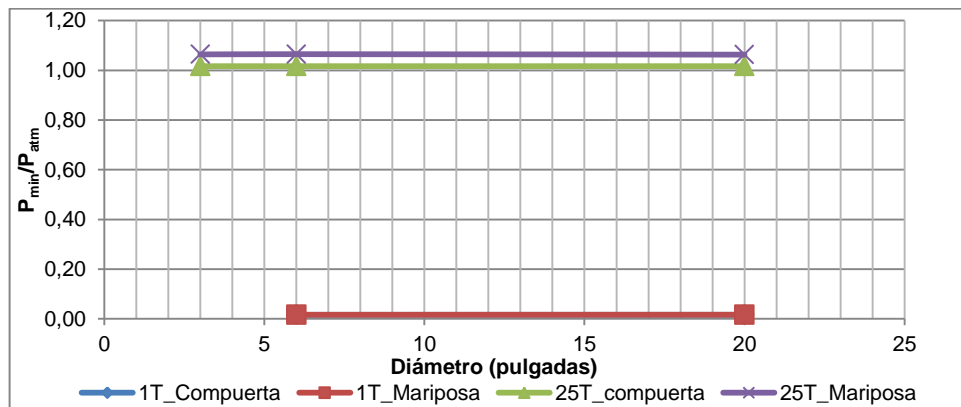
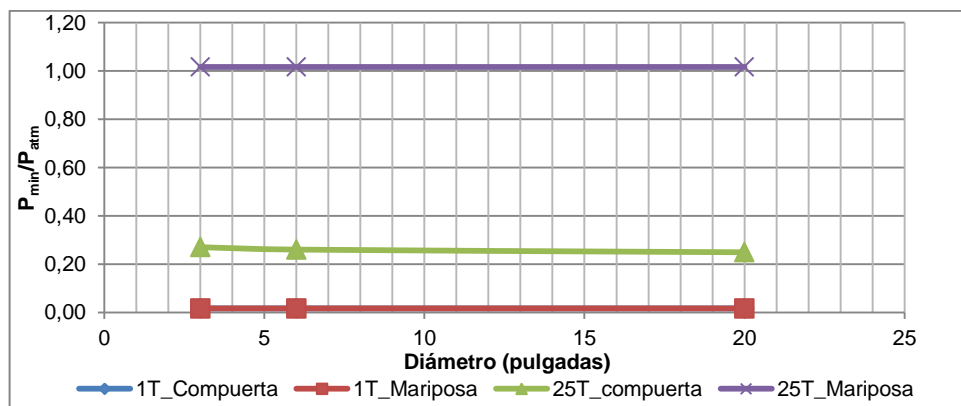


Figura 7.40 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Cierre simultáneo. $V = 2$ m/s. $L/D = 25000$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$



Con base en estas afirmaciones se corrobora que las conclusiones del numeral 7.1.3. para el diámetro en una bifurcación con válvula de compuerta son válidas también para redes con válvula de mariposa.

7.2.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D.

Las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) tienen un comportamiento similar con válvulas de compuerta o mariposa, como se aprecia en las figuras 7.41 y 7.42. Se confirmó que la magnitud de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) varía en función de la relación L/D, para tiempos de cierre menores a 25T (50L/a), mientras que no se observa diferencia para maniobras con tiempos mayores o iguales a 25T (50L/a), con iguales tiempos de cierre y velocidad. Adicionalmente, para maniobras con tiempos mayores o iguales a 25T (50L/a) la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) tiende a un valor cercano a 1.

La diferencia que se observa en las figuras 7.41 y 7.42 entre los datos obtenidos para válvulas de mariposa y compuerta obedecen al tiempo de cierre. Esto se explica en detalle en el numeral 7.2.1.

Figura 7.41 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2 \text{ m/s}$.

$$L_1/D_1 = 4L_2/D_2$$

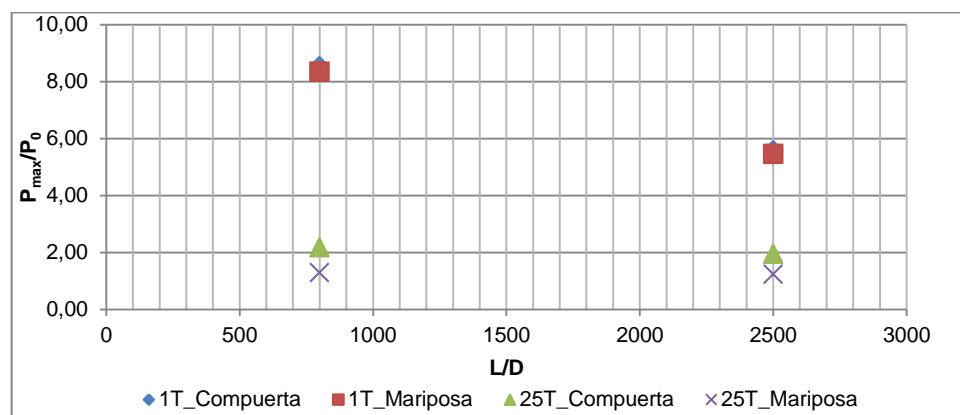
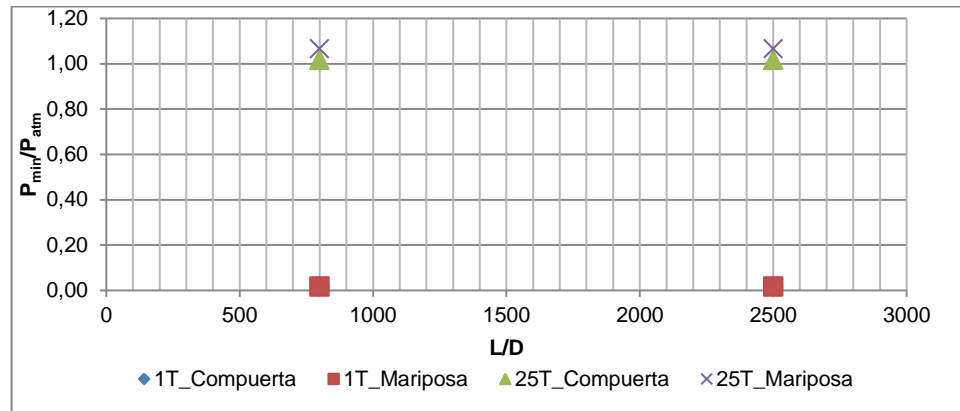


Figura 7.42 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 4$ m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$



7.2.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$).

De acuerdo con las figuras 7.43, 7.44, 7.45 y 7.46 se confirma lo que se afirmó en el numeral 7.1.4. :

- La proporción entre las relaciones L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) no afecta el valor de las relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), para ninguna de las válvulas evaluadas, cuando se emplean tiempos de cierre mayores o iguales a $25T$ ($50L/a$), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) son muy similares.
- La relación longitud-diámetro de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) no afecta los valores de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) para tiempos de maniobra menores o iguales a $15T$ ($30L/a$) y mayores o iguales a $75T$ ($50L/a$), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1 = n L_i/D_i$) son muy similares.

Figura 7.43 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s.

$L/D = 800$. $t = 1T$

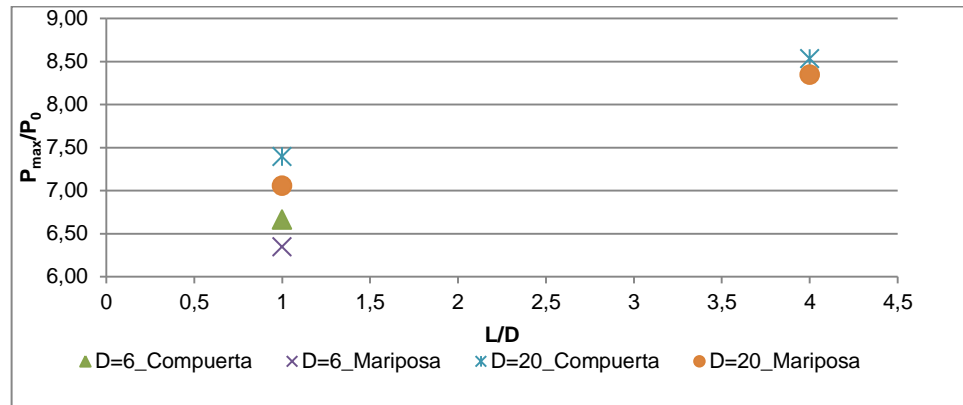


Figura 7.44 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 3$ m/s.

$L/D = 2500$. $t = 25T$

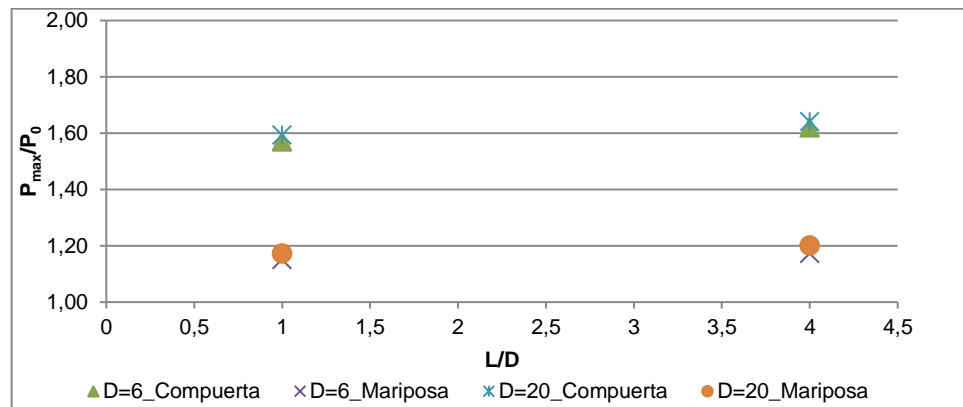


Figura 7.45 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 2$

m/s. $L/D = 800$. $t = 1T$

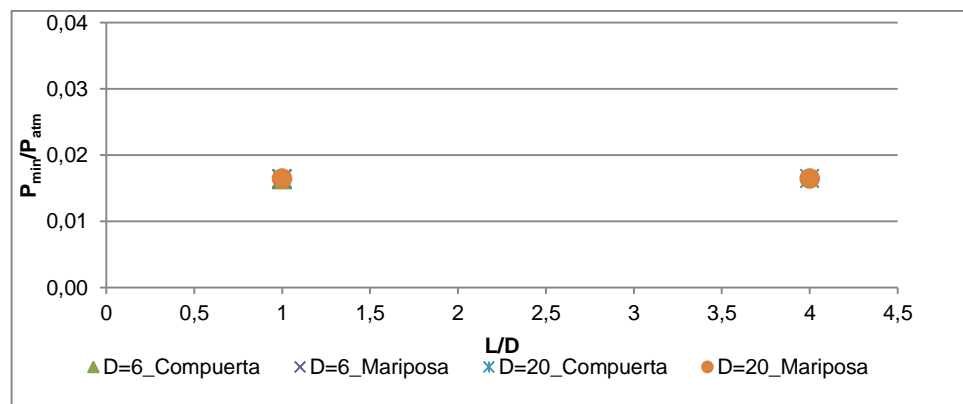
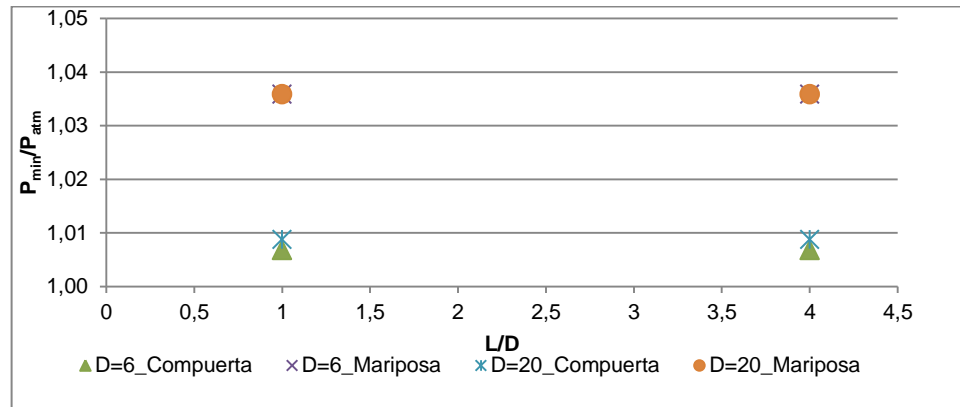


Figura 7.46 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 3$ m/s. $L/D = 2500$. $t = 75T$



7.3. TRIFURCACIÓN

La tercera y cuarta configuración empleadas para el análisis de sensibilidad correspondió a la tipología de trifurcación con válvulas de compuerta y mariposa, respectivamente. En esta sección se comparan los resultados obtenidos con trifurcación y los que se presentaron en los numerales 7.1. y 7.2. con bifurcación. En el Anexo C se presentan los resultados obtenidos de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) para la configuración de trifurcación y válvula de compuertas. Por su parte, en el Anexo D se muestran los correspondientes a trifurcación y válvula de mariposa.

7.3.1. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al tiempo de cierre.

En las figuras 7.47, 7.48, 7.49 y 7.50 se comparan los resultados obtenidos para las dos tipologías utilizadas para el análisis con diferentes tiempos de maniobra. De acuerdo con esta información se concluye que el cambio de tipología (de bifurcación a trifurcación) no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) diferentes a

los generados por el tiempo de la maniobra, los cuales se indican en los numerales 7.1.1. y 7.2.1. , por cuanto se obtienen valores muy parecidos para diferentes tiempos de cierre con las dos topologías. Por lo tanto, se confirma que las conclusiones de los numerales 7.1.1. y 7.2.1. para bifurcaciones también son válidas para sistemas a presión trifurcados.

Figura 7.47 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 4 \text{ m/s}$. $L/D = 800$. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de compuerta. $L_1/D_1 = L_2/D_2$

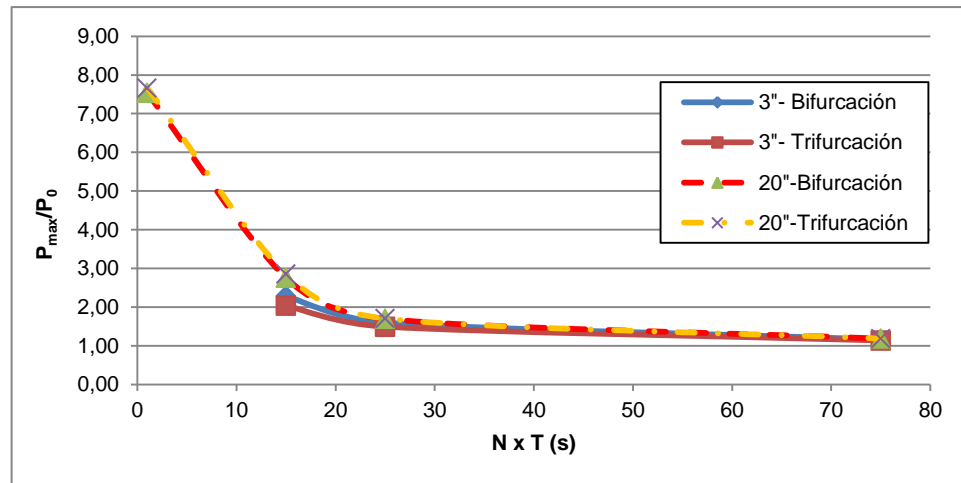


Figura 7.48 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2 \text{ m/s}$. $L/D = 2500$. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de mariposa. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$

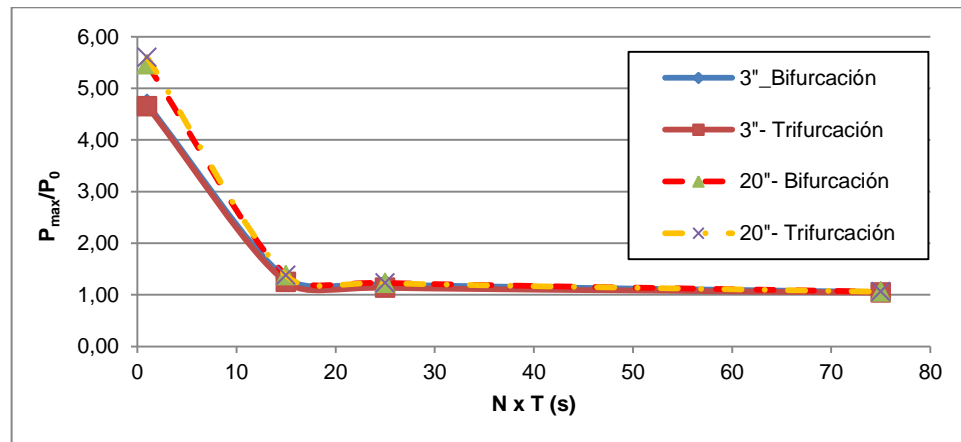


Figura 7.49 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 4$ m/s. $L/D = 800$. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de compuerta. $L_1/D_1 = L_2/D_2$

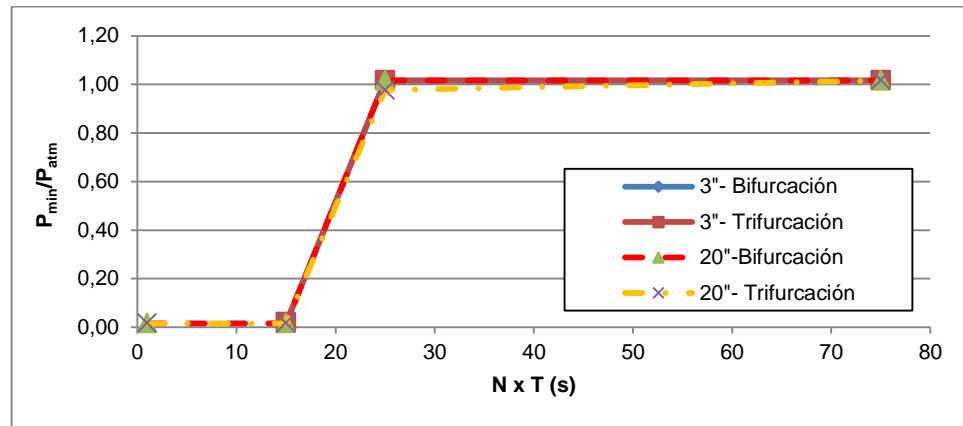
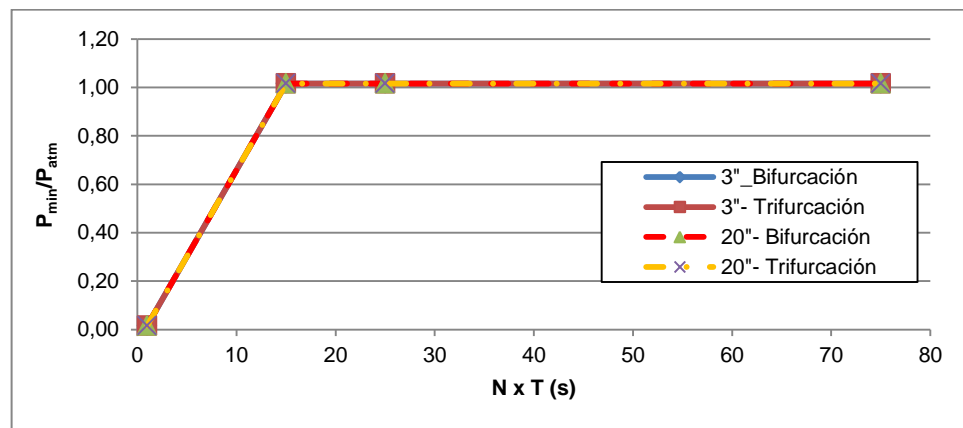


Figura 7.50 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 2$ m/s. $L/D = 2500$. Diámetros de 3 y 20". Válvulas de mariposa. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$



7.3.2. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la velocidad en flujo permanente.

En las figuras 7.51, 7.52, 7.53 y 7.54 se comparan los resultados obtenidos con diferentes velocidades para las dos tipologías utilizadas. De acuerdo con esta información se concluye que el cambio de tipología (de bifurcación a trifurcación) no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y

presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{\min}/P_{atm}) diferentes a los generados por la velocidad en flujo permanente, los cuales se indican en los numerales 7.1.2. y 7.2.2. , por cuanto se obtienen valores muy parecidos para diferentes velocidades con las dos topologías. Por lo tanto, se confirma que las conclusiones de los numerales 7.1.2. y 7.2.2. para bifurcaciones también son válidas para sistemas a presión trifurcados.

Figura 7.51 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvulas de compuerta. $L/D = 800$. $V = 2$ m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$

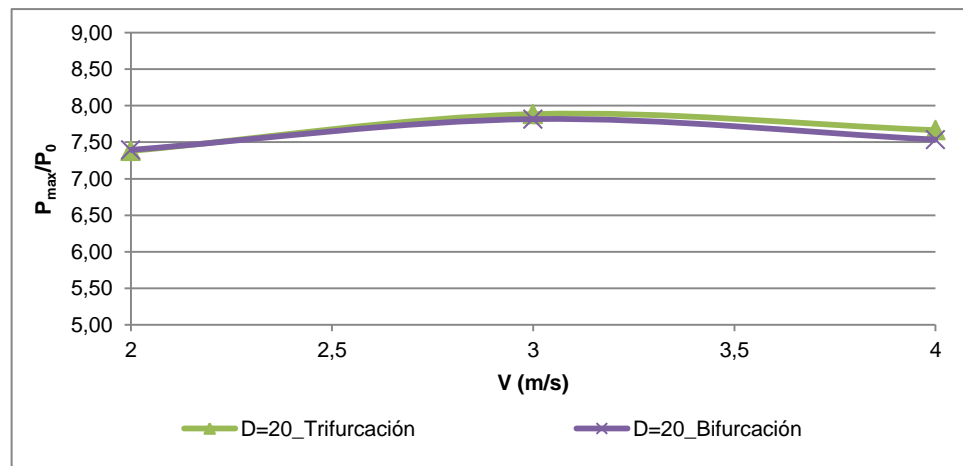


Figura 7.52 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. Válvula de mariposa. $t = 25T$. $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$

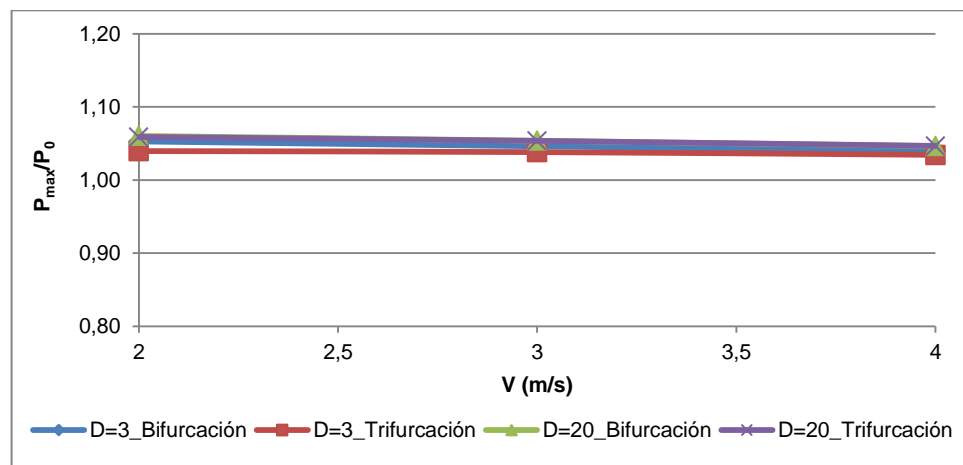


Figura 7.53 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvula de compuerta. $L/D = 800$. $V = 2$ m/s. $t = 1T$. $L_1/D_1 = 1L_2/D_2$

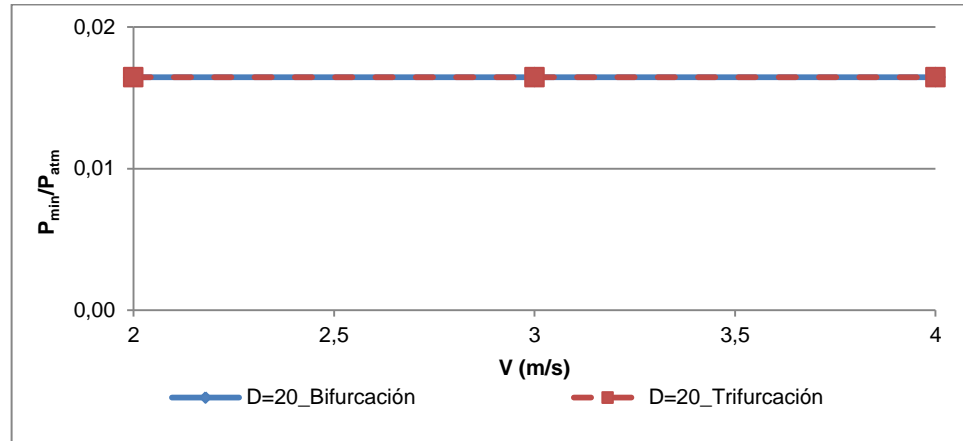
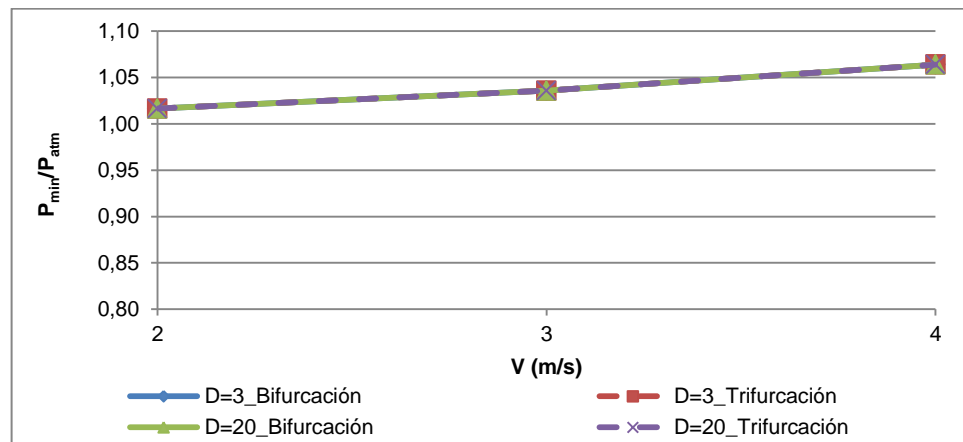


Figura 7.54 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. Válvula de mariposa. $t = 25T$. $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 41L_2/D_2$

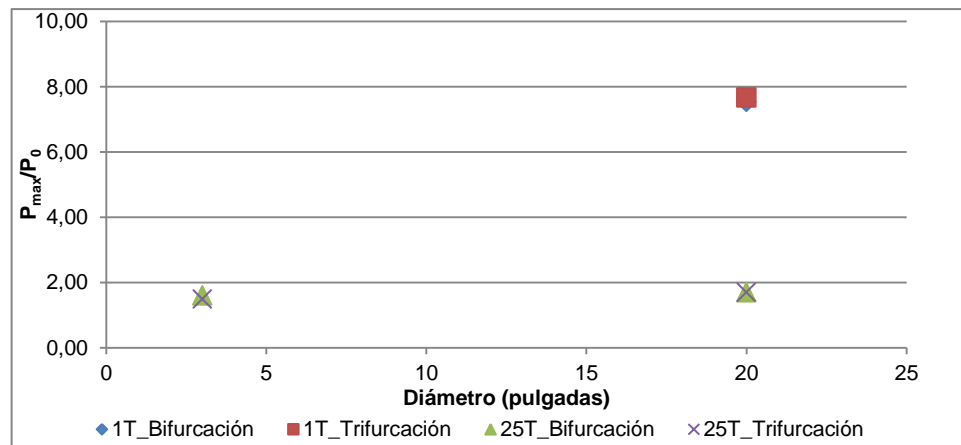


7.3.3. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) al diámetro.

En las figuras 7.55, 7.56, 7.57 y 7.58 se comparan los resultados obtenidos con diferentes diámetros para las dos tipologías utilizadas en el análisis. De acuerdo con esta información se concluye que el cambio de tipología (de bifurcación a trifurcación) no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión

estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) diferentes a los generados por el diámetro, los cuales se indican en los numerales 7.1.3. y 7.2.3. , por cuanto para las dos tipologías se obtienen valores muy parecidos para diámetros entre 3 y 20". Por lo tanto, se confirma que las conclusiones de los numerales 7.1.3. y 7.2.3. para bifurcaciones también son válidas para sistemas a presión trifurcados.

**Figura 7.55 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 4$ m/s.
 $L/D = 800$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. Válvula de compuerta**



**Figura 7.56 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s.
 $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa**

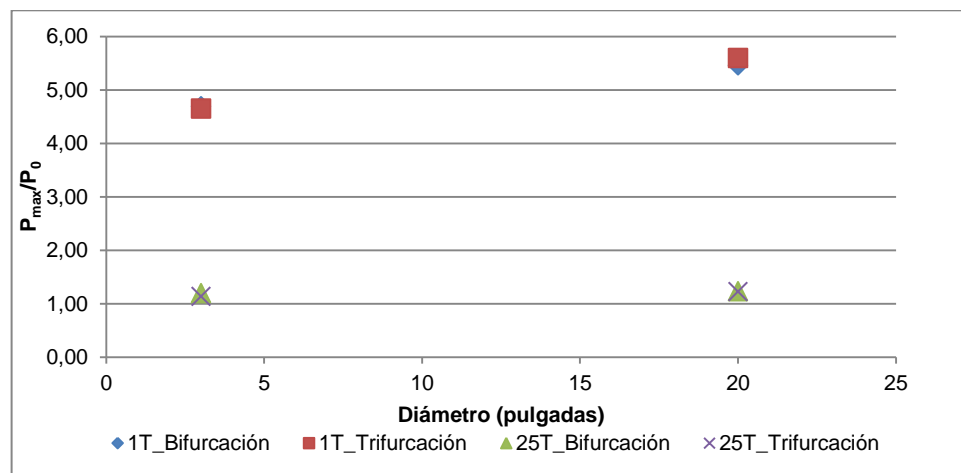


Figura 7.57 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 4$ m/s. $L/D = 800$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. Válvula de compuerta

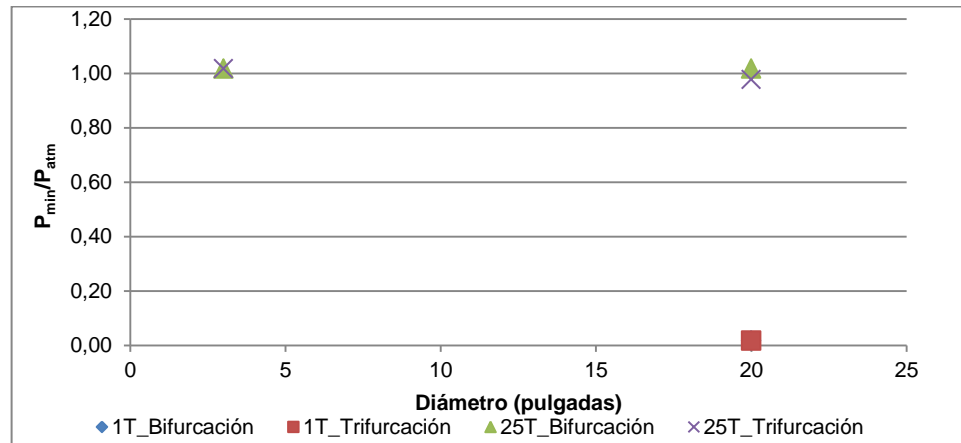
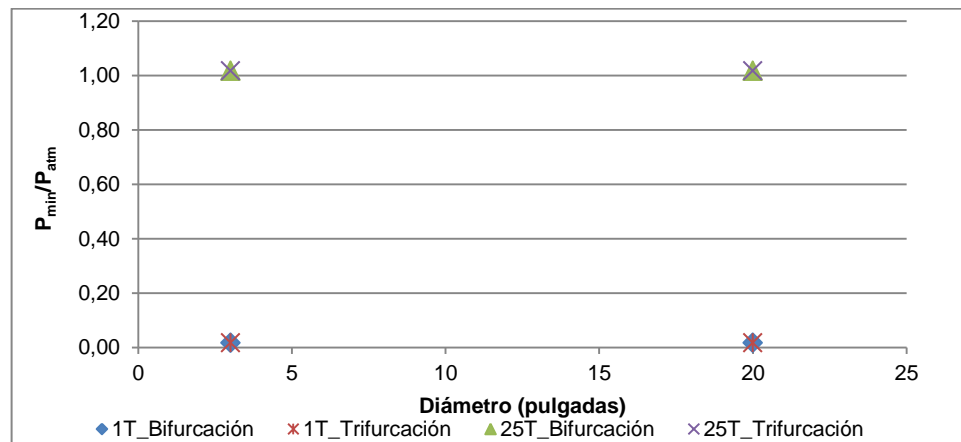


Figura 7.58 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 2$ m/s. $L/D = 2500$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa

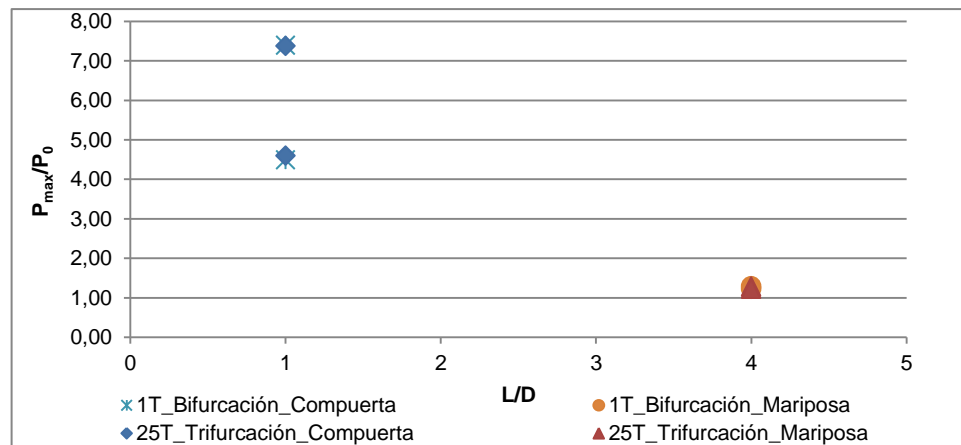


7.3.4. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la relación L/D .

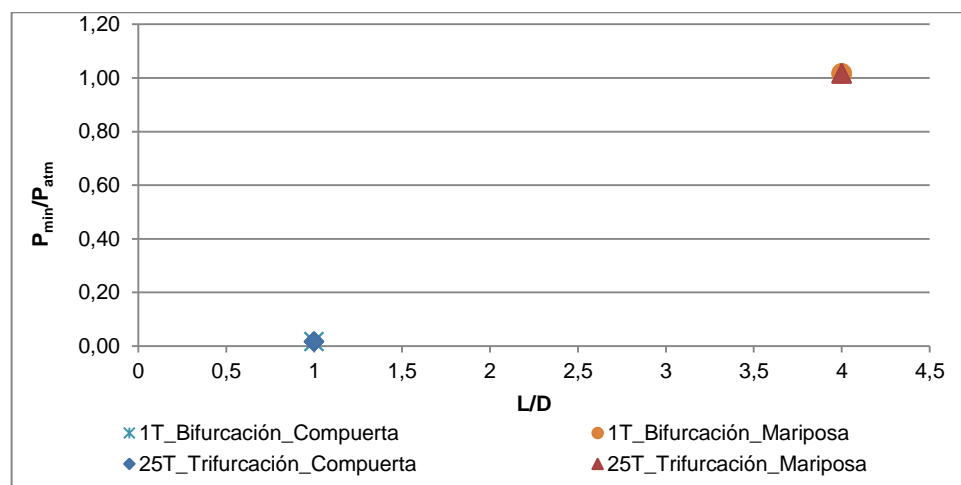
En las figuras 7.59 y 7.60 se comparan los resultados obtenidos con diferentes relaciones L/D para las dos tipologías utilizadas en el análisis. De acuerdo con esta información se concluye que el cambio de tipología (de bifurcación a trifurcación) no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y

presión dinámica mínima - presión atmosférica (P_{\min}/P_{atm}) diferentes a los generados por la relación L/D , los cuales se indican en los numerales 7.1.4. y 7.2.4. , por cuanto se obtienen valores muy parecidos para diferentes velocidades con las dos topologías. Por lo tanto, se confirma que las conclusiones de los numerales 7.1.4. y 7.2.4. para bifurcaciones también son válidas para sistemas a presión trifurcados.

**Figura 7.59 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2 \text{ m/s}$.
 $t = 1T$. $L_1/D_1 = L_2/D_2$. $D = 20''$.**



**Figura 7.60 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica.
 $V = 2 \text{ m/s}$. $t = 25T$. $D=20''$. $L_1/D_1 = 4L_2/D_2$. Válvula de mariposa**



7.3.5. Sensibilidad de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) a la proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$).

En las figuras 7.61 y 7.62 se comparan los resultados obtenidos para las dos tipologías utilizadas para el análisis, con diferentes proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$). De acuerdo con esta información se concluye que el cambio de tipología, de bifurcación a trifurcación, no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) diferentes a los generados por la proporción L/D de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$), los cuales se indican en los numerales 7.1.5. y 7.2.5. por cuanto se obtienen valores muy parecidos para diferentes velocidades con las dos topologías. Por lo tanto, se confirma que las conclusiones de los numerales 7.1.5. y 7.2.5. para bifurcaciones también son válidas para sistemas a presión trifurcados.

Figura 7.61 Variación de la relación presión dinámica máxima - presión estática. $V = 2$ m/s. $L/D = 800$. $D=20''$.

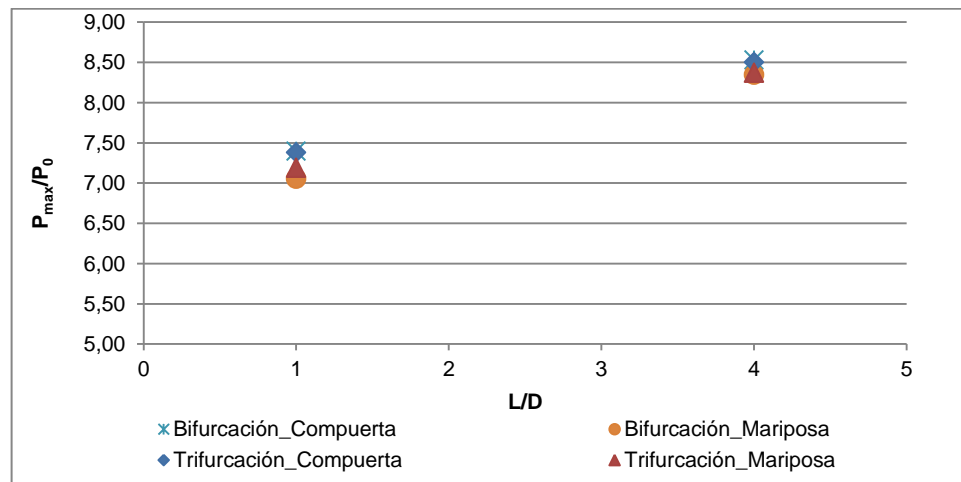
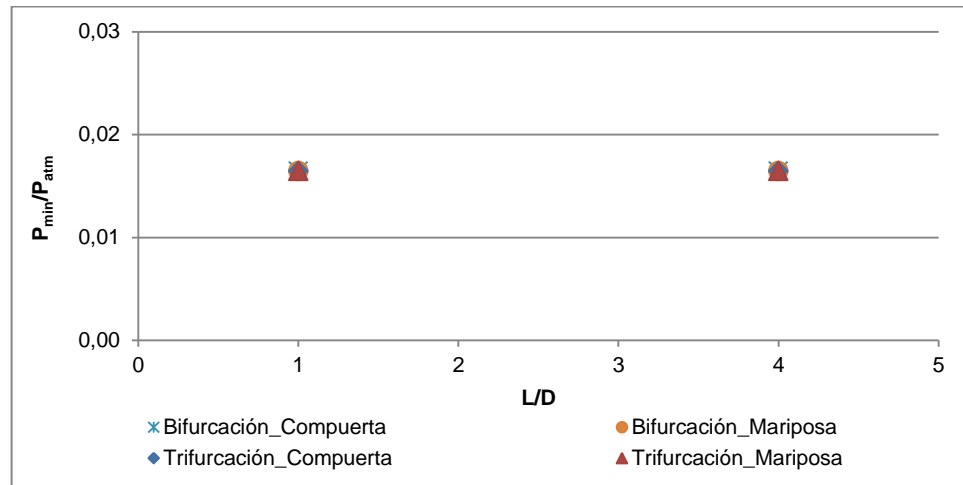


Figura 7.62 Variación de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica. $V = 3$ m/s. $L/D = 2500$. $D=20''$.



Capítulo 8

Conclusiones

A partir de los resultados del capítulo 7 se concluye lo siguiente:

- Con cierres superiores a 75T (150 L/a), en redes con tuberías de PVC y válvulas de compuerta, la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) tienden a un valor mínimo cercano a 1, no mayor a 1,20, mientras que para las válvulas de mariposa se identificó que con un tiempo de cierre de 25T (50L/a) se obtiene el mismo efecto en la relación entre la presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) de cerrar en 75T (150L/a) con una válvula de compuerta. Para tiempos de cierre mayores (75T con válvulas de compuerta y 25T para válvulas de mariposa) la magnitud de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) depende únicamente del tiempo de la maniobra. Por lo tanto, si se adoptan tiempos de cierre mayores o iguales a 75T (150 L/a), en redes con tuberías de PVC, la sobrepresión puede adoptarse como el 20% de la presión estática.
- Existe un tiempo para el cual la relación entre la presión dinámica mínima y la presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) alcanza un valor constante cercano a 1. El valor de este tiempo depende de la velocidad en condiciones permanentes y de la relación longitud-diámetro (L/D). En general, empleando tiempos de cierre mayores o iguales a 75 (150 L/a), en redes con tuberías de PVC y válvulas de compuerta, se consigue esta condición, por lo que se asegura que la presión mínima en la tubería sea igual o mayor a 10,33 m.c.a. Para las válvulas de mariposa se identificó que con un tiempo de cierre de 15T (30L/a) se obtiene el mismo efecto en la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) que al cerrar en 75T (150L/a) con una válvula de compuerta.
- El mayor aumento de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) no corresponde a la simulación que tiene máxima velocidad de flujo en condiciones permanentes. Se identificó que el máximo de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_o$) se produce cuando la velocidad está entre 2 y 4 m/s. Esto se debe a que el nivel requerido en el embalse para generar

velocidades altas es tan grande que la proporción del aumento de presión es menor, aun cuando el valor neto de presión estimado sea mayor.

- La velocidad en flujo permanente es un factor determinante en el aumento de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$), para tiempos de cierre menores a 50T (100 L/a) y tuberías de PVC. Mientras que para tiempos mayores a 75T (150 L/a) la velocidad que el flujo tenga en condiciones permanentes no afecta significativamente la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$).
- No se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y el valor de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) para tiempos de maniobra mayores o iguales a 15T (30L/a), ya que no existen diferencias importantes entre los valores obtenidos para diámetros entre 3 y 20", en tuberías en PVC. En el caso de los cierres instantáneos, es decir, que $t = 1T$, se observa una variación de los valores de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ en función del diámetro de la tubería. Adicionalmente, no se encontró dependencia entre el diámetro de la tubería y la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).
- La magnitud de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) varía de forma inversa con la relación L/D, es decir, se presenta una disminución de $P_{m\acute{a}x}/P_0$ conforme se aumenta el valor de L/D, para tiempos de maniobra menores a 25T (50L/a). Mientras que para maniobras con tiempos de cierre mayores o iguales a 25T (150 L/a) no se presenta influencia de la proporción L/D en los valores de la relación entre la presión dinámica máxima y la presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$).
- La relación longitud-diámetro de la tubería principal y sus ramales no afecta significativamente el valor de la relación presión dinámica máxima – presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) cuando se emplea tiempos de cierre mayores o iguales a 25T (50L/a), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1=n L_i/D_i$) son muy similares.
- La relación longitud-diámetro de la tubería principal y sus ramales ($L_1/D_1=n L_i/D_i$) no afecta los valores de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) para tiempos de maniobra menores o iguales a 15T (30L/a) y mayores o

iguales a 75T (50L/a), ya que los valores obtenidos para diferentes n ($L_1/D_1=n$ L_i/D_i) son similares.

- El cambio de tipología (de bifurcación a trifurcación) no provoca variaciones en los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$).
- Cuando se emplean válvulas de mariposa y se realizan cierres en tiempos iguales a 1T (2L/a) se presentan valores muy similares de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), a los estimados en sistemas con válvulas de compuerta para el mismo tiempo de cierre. Al emplear válvulas de mariposa y realizar cierres en tiempos mayores a 1T (2L/a) se presenta reducción de los valores de la relación presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y aumento de los valores de la relación presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$), en comparación con cierres hechos con válvulas de compuerta y la misma duración de la maniobra. Las diferencias que se presentan en los valores de las relaciones $P_{m\acute{a}x}/P_0$ y $P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$, entre los estimados para válvulas de mariposa y de compuerta, obedecen a que la reducción de los coeficientes de descarga es más lenta para la válvula de mariposa a partir de la apertura del 75%. Esto produce que la disminución del caudal, desde la condición en flujo permanente a cero, se produzca más lentamente cuando se emplean válvulas de mariposa, en comparación con válvulas de compuerta. En consecuencia, los valores de la relación $P_{m\acute{a}x}/P_0$ producidos por el accionamiento de válvulas de mariposa son menores a los que se presentan con válvulas de compuerta, para el mismo tiempo de cierre
- Las variables con mayor influencia en las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) es el tiempo de la maniobra y la velocidad en flujo permanente, cuando el cierre es instantáneo ($t=2L/a$), considerando que se obtienen valores similares aun cuando se modifican las demás variables. Si el tiempo de la maniobra es mayor a 1T (2L/a) y menor a 75T (150L/a) las variables que definen mejor los valores de las relaciones presión dinámica máxima - presión estática ($P_{m\acute{a}x}/P_0$) y presión dinámica mínima - presión atmosférica ($P_{m\acute{i}n}/P_{atm}$) son el tiempo de la

maniobra, el tipo de válvula, la velocidad y la relación L/D. Finalmente, a partir del tiempo de maniobra de 75T (150L/a) la intensidad del fenómeno varía en función del tiempo de cierre, por cuanto se obtienen valores semejantes aun cuando se modifiquen las demás variable empleadas en el estudio de sensibilidad.

Capítulo 9

Recomendaciones

De acuerdo con los resultados y el análisis de este estudio se hacen las siguientes recomendaciones:

- Los tiempos de maniobra de las válvulas en redes con tuberías en PVC deben ser iguales o superiores a 75T (150 L/a), para garantizar que la máxima presión dinámica no sea mayor al 20% de la presión estática ni la presión mínima sea menor que la presión atmosférica.
- Se deben emplear válvulas de mariposa para redes en las cuales, por sus características de operación, se requiera reducir el tiempo de las maniobras sin poner en riesgo la estabilidad de la tubería.
- Complementar estas recomendaciones con la simulación de escenarios críticos de operación en un software especializado, como el AFT Impulse[®], para estimar con mayor certeza la respuesta de la red a las diferentes variables en sus condiciones particulares.
- Complementar este estudio de sensibilidad con nuevos tipos de válvulas, como la cilíndrica y materiales de tuberías como el GRP, etc.

Bibliografía

1. Chaudry, M. Hanif (1979). *Applied Hydraulic Transients*. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN 0-442-21517-7.
2. Tullis, Paul (1989). *Hydraulics of pipelines: Pumps, valves, cavitation, transients*. United States of America: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-833285-5.
3. Martin, Samuel (1999). *Hydraulic Transient Design for Pipeline Systems*. [aut. libro] Larry MAYS. *Hydraulic Design Handbook*. United States of America: McGraw-Hill, 12.
4. Larock, B., Jeppson, R. & Watters, G. (2000). *Hydraulics of Pipelines Systems*. United States of America: CRC Press. ISBN 0-8493-1806-8.
5. Kaliatka, A., Kopustinskas, V. & Vaisnoras, M. (2009). Water Hammer Model Sensitivity study by the Fast Model. 1, Kaunas, Lithuania: Lithuanian Academy of Sciences Publishers, *Energetika*, vol. 55.
6. Streeter, V. & Wylie, B. *Mécanica de los fluidos*. Ciudad de México: McGraw Hill. ISBN 968-451-841-2.
7. Wichowskii, R. (2006). *Hydraulic Transients Analysis in Pipe Networks by the Method of Characteristics (MOC)*. 3, Gdansk: Instituto de Hydro-Ingenieria de la Academia Polaca de las Ciencias, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, vol. 53, pp. 267-291. ISSN 1231-3726.
8. Boulos, P.F. et al. (2005). Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. 5, *Journal American Water Works Association: American Water Works Association*, *Journal American Water Works Association*, vol. 97, pp. 111-124. JAW_0061555.
9. Larock, B.E., Jeppson, R.W. & Watter, G. (2000). *Hidraulics of Pipelines Systems*. s.l.: CRC Press. ISBN 0-8493-1806-8.
10. Emadi, J. & Solemani, A. (2011). *Maximum Water Hammer Sensitivity Analysis*. 1, 2 World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 5.
11. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título B: Sistemas de Acueducto . *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-2000)*. Bogotá D.C.: República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.
12. Salas, A.F. & Urrestarazu, L.P. (2007). OpenCourseWare. Universidad de Sevilla. [En línea]. [Citado el: 12 de 02 de 2015.] http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial_10.htm.

13. Gélvez, Erik (2014). Fenómeno transitorios en una bifurcación por operación de dispositivos de control. Estudio de sensibilidad. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014. Proyecto de grado para optar al título de especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente.
14. Know, Hyuk Jae (2007). Analysis of Transient Flow in a Piping System. 4, *KSCE Journal of civil Engineering*, vol. 11, pp. 209-214.
15. Rodríguez, Alfonso (2001). *Hidráulica experimental*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN 9588060176.

Anexo A Resumen de resultados