

**ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA SOBREPRESIÓN EN
UNA TUBERÍA CON RAMIFICACIONES, PARA
TRANSPORTE DE LÍQUIDOS.**

Ing. John Da Vera Cruz

Trabajo de Grado presentado a la ilustre
Universidad Central de Venezuela para
Optar el Título de Especialista en Diseño
De Sistemas de Tuberías.

Caracas, Julio de 2001

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA SOBREPRESIÓN EN UNA TUBERÍA CON RAMIFICACIONES, PARA TRANSPORTE DE LÍQUIDOS.

Autor: Ing. John Da Vera Cruz

Tutor: Prof. Dr. Ing. Stefan Zarea

Caracas, Julio de 2001

195 páginas, 03 apéndices, 38 referencias bibliográficas.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un programa computacional fundamentado en el método de las Características con la finalidad de calcular la sobrepresión generada por el accionamiento de válvulas en diferentes sistemas de tuberías. El método de las Características se basa en la integración aproximada de las ecuaciones de movimiento y continuidad a lo largo de curvas características que surgen de una sustitución que convierte al sistema de ecuaciones de derivadas parciales en un sistema de ecuaciones de derivadas totales. El estudio se refiere a un sistema hidráulico constituido por un tanque abierto lleno de líquido, alimentando una tubería principal conectada a tres ramales ramificados provistos de válvulas y dispositivos de protección. Se evaluaron 191 casos en total con el objetivo de ilustrar la influencia de diferentes parámetros geométricos de las tuberías y leyes de cierre de válvula. Además se cuantificó la influencia que tienen los ramales inactivos sobre el incremento de la sobrepresión en el sistema, poniéndose en evidencia que existen casos caracterizados por presiones mayores que los valores obtenidos con la fórmula clásica de Joukowsky, como consecuencia de la reflexión y superposición de las ondas en el sistema hidráulico. Se calculó y graficó la variación de la presión en cuatro secciones características: válvulas de los tres ramales y el nodo de la ramificación, considerando la alternativa sin dispositivos de protección y dos versiones adicionales correspondientes a la protección con by-pass y luego con válvula de alivio. Se comparó la eficacia de los dos dispositivos de atenuación para el Golpe de Ariete, obteniéndose mejores resultados con válvula de alivio que con la configuración by-pass.

DEDICATORIA

Este Trabajo Especial de Grado representa la culminación de una nueva etapa en mi vida, durante la misma he tenido nuevamente la oportunidad de contar con todo el apoyo de mis seres queridos, por esta razón quiero dedicarles este trabajo a ustedes.

- A mis padres, por hacer de mi todo lo que hoy en día soy.
- A mis hermanos, por poder contar siempre con ustedes.
- A ti, por estar a mi lado en las buenas como en las malas apoyándome y considerándome en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero reconocimiento al Prof. Dr. Ing. Stefan Zarea por haberme propuesto un tema de permanente actualidad, formulado con precisión y objetivos que me permitieron confirmar sus hipótesis, por sus consultas enriquecedoras y por la verificación exigente de mi trabajo.

Quiero agradecer al Ing. Jorge Martinez por el interés manifestado y haber creado optimas condiciones de trabajo.

Expreso mi gratitud a Inelectra por asegurarme la beca que me permitió realizar los estudios de la especialización contribuyendo de esta manera a mi desarrollo profesional.

INDICE GENERAL

PORTADA	i
RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xiv
INDICE DE GRÁFICOS	xvi
NOMENCLATURA Y SIGLAS	xxvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I : ECUACIONES BASICAS Y METODOS DE CALCULO DEL GOLPE DE ARIETE.	
I.1 GENERALIDADES	3
I.2 ECUACIÓN DE MOVIMIENTO	4
I.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	5
I.4 SOLUCIONES DE RIEMANN AL GOLPE DE ARIETE	7
I.5 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELÁSTICAS	9
I.5.1 Velocidad de Propagación de la Onda	9
I.5.2 Reflexión y Transmisión de Ondas	9

I.5.3 Cierre de una válvula.....	13
I.6 PRINCIPALES MÉTODOS DE CALCULO.....	18
I.6.1 Método Aritmético.....	18
I.6.2 Método Gráfico.....	18
I.6.3 Método Algebraico.....	19
I.6.4 Método de las Ondas Físicas.....	19
I.6.5 Método de la Impedancia.....	20
I.6.6 Método de las Características.....	20
CAPITULO II : METODO DE LAS CARACTERÍSTICAS	
II.1 ECUACIONES CARACTERÍSTICAS.....	21
II.2 ECUACIONES POR DIFERENCIAS FINITAS.....	22
II.3 CONDICIONES DE FRONTERA PARA UNA TUBERÍA	
DE CARACTERÍSTICAS CONSTANTES.....	25
II.3.1 Tanque de altura constante en el extremo aguas arriba.....	25
II.3.2 Válvula en el extremo aguas abajo.....	25
II.3.3 Extremo cerrado aguas abajo.....	26
II.4 CONDICIONES DE FRONTERA PARA SISTEMAS	
COMPUESTOS.....	26
II.4.1 Conexión en serie.....	27
II.4.2 Unión general.....	27

II.5 CRITERIOS DE ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA.....	30
II.6 CONTROL Y ATENUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL	
 GOLPE DE ARIETE.....	32
 II.6.1 Válvulas de Alivio.....	32
 II.6.2 By-Pass.....	33
CAPITULO III : PROGRAMA DE CALCULO DE LA PRESIÓN EN	
SISTEMAS HIDRÁULICOS RAMIFICADOS.	
III.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ELABORADO	34
III.2 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA ELABORADO.....	35
CAPITULO IV : SISTEMAS DE TUBERÍAS RAMIFICADOS	
ESTUDIADOS.	
IV.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS.....	36
IV.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y FÍSICAS DE LOS SISTEMAS	
HIDRÁULICOS.....	37
IV.3 CASO A.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN.....	39
 IV.3.1 Parámetros y características operacionales del caso A.1.....	39
 IV.3.2 Resultados obtenidos en el caso A.1.....	41
 IV.3.3 Análisis de resultados caso A.1.....	43
IV.4 CASO A.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO.....	46
 IV.4.1 Parámetros y características operacionales del caso A.2.....	46

IV.4.2 Resultados obtenidos en el caso A.2.....	47
IV.4.3 Análisis de resultados caso A.2.	48
IV.5 CASO A.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS.....	49
IV.5.1 Parámetros y características operacionales del caso A.3.....	49
IV.5.2 Resultados obtenidos en el caso A.3.....	51
IV.5.3 Análisis de resultados caso A.3.	52
IV.6 CASO B.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN.....	53
IV.6.1 Parámetros y características operacionales del caso B.1.....	53
IV.6.2 Resultados obtenidos en el caso B.1.....	56
IV.6.3 Análisis de resultados caso B.1.	62
IV.7 CASO B.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO.....	65
IV.7.1 Parámetros y características operacionales del caso B.2.....	65
IV.7.2 Resultados obtenidos en el caso B.2.....	66
IV.7.3 Análisis de resultados caso B.2.	68
IV.8 CASO B.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS.....	69
IV.8.1 Parámetros y características operacionales del caso B.3.....	69
IV.8.2 Resultados obtenidos en el caso B.3.....	70
IV.5.3 Análisis de resultados caso B.3.	71
IV.9 CASO C.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN.....	72
IV.9.1 Parámetros y características operacionales del caso C.1.....	72
IV.9.2 Resultados obtenidos en el caso C.1.....	76
IV.9.3 Análisis de resultados caso C.1.	96
IV.10 CASO C.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO.....	103
IV.10.1 Parámetros y características operacionales del caso C.2.....	103

IV.10.2 Resultados obtenidos en el caso C.2.....	104
IV.10.3 Análisis de resultados caso C.2.	107
IV.11 CASO C.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS.....	108
IV.11.1 Parámetros y características operacionales del caso C.3.....	108
IV.11.2 Resultados obtenidos en el caso C.3.....	109
IV.11.3 Análisis de resultados caso C.3.	111
IV.12 CASO D.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN.....	112
IV.12.1 Parámetros y características operacionales del caso D.1.....	112
IV.12.2 Resultados obtenidos en el caso D.1.....	115
IV.12.3 Análisis de resultados caso D.1.	121
IV.13 CASO D.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO.....	124
IV.13.1 Parámetros y características operacionales del caso D.2.....	124
IV.13.2 Resultados obtenidos en el caso D.2.....	125
IV.13.3 Análisis de resultados caso D.2.	127
IV.14 CASO D.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS.....	128
IV.14.1 Parámetros y características operacionales del caso D.3.....	128
IV.14.2 Resultados obtenidos en el caso D.3.....	129
IV.14.3 Análisis de resultados caso D.3.	131
IV.15 CASO E.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN.....	132
IV.15.1 Parámetros y características operacionales del caso E.1.....	132
IV.15.2 Resultados obtenidos en el caso E.1.....	136
IV.15.3 Análisis de resultados caso E.1.....	156
IV.16 CASO E.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO.....	163
IV.16.1 Parámetros y características operacionales del caso E.2.....	163

IV.16.2 Resultados obtenidos en el caso E.2.....	164
IV.16.3 Análisis de resultados caso E.2.	167
IV.17 CASO E.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS.....	169
IV.17.1 Parámetros y características operacionales del caso E.3.....	169
IV.17.2 Resultados obtenidos en el caso E.3.....	170
IV.17.3 Análisis de resultados caso E.3.....	172
CONCLUSIONES.....	173
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
APÉNDICES.....	181
APÉNDICE A: Programa en FORTRAN.....	181
APÉNDICE B: Extracto Norma ASME/ANSI B16.5.....	192
APÉNDICE C: Ejemplo 3-1 del libro “Fluid Transients in System”.....	194

INDICE DE FIGURAS

Figura No.	Descripción	Pág.
I.2.1:	Diagrama de cuerpo libre para la aplicación de la ecuación de movimiento.....	4
I.3.1:	Volumen de control para el desarrollo de la ecuación de continuidad.....	6
I.5.1:	Reflexión de la onda en un tanque de altura constante.....	10
I.5.2:	Reflexión de la onda en un extremo cerrado.....	10
I.5.3:	Transmisión y reflexión de la onda en un cambio de sección transversal.....	11
I.5.4:	Transmisión y reflexión de la onda en derivaciones.....	12
I.5.5:	Sistema con válvula que se cierra instantáneamente.....	13
I.5.6:	Evolución de las condiciones de flujo durante el cierre instantáneo de una válvula.....	15
I.5.7:	Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula.....	16
I.5.8:	Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula tomando en cuenta los efectos de la fricción.....	16
I.5.9:	Fenómeno de separación de la columna de líquida.....	17
II.1.1:	Líneas características en el plano xt	22
II.2.1:	Malla rectangular para la solución de las ecuaciones de características.....	23
II.4.1:	Conexión en serie.....	27
II.4.2:	Unión de tuberías.....	28

II.5.1:	Malla para un esquema de tiempos especificados.....	31
II.6.1	Válvula de alivio de presión.....	32
II.6.2	Configuración By-Pass.....	33
IV.3.1:	Esquema A.1: Sistema tanque, tubería y válvula.....	39
IV.3.2:	Ley de cierre de la válvula a.....	40
IV.4.1:	Esquema A.2: Sistema tanque, tubería y válvula.....	46
IV.5.1:	Esquema A.3 : Sistema tanque, tuberías, válvula y by-pass.....	49
IV.6.1:	Esquema B.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	53
IV.6.2:	Ley de cierre de la válvula a.....	55
IV.6.3:	Ley de cierre de la válvula b.....	55
IV.7.1:	Esquema B.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	65
IV.8.1:	Esquema B.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	69
IV.9.1:	Esquema C.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	72
IV.9.2:	Ley de cierre de la válvula a.....	74
IV.9.3:	Ley de cierre de la válvula b.....	74
IV.9.4:	Ley de cierre de la válvula c.....	74
IV.10.1:	Esquema C.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	103
IV.11.1:	Esquema C.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	108
IV.12.1:	Esquema D.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	112
IV.12.2:	Ley de cierre de la válvula a.....	114
IV.12.3:	Ley de cierre de la válvula b.....	114
IV.13.1:	Esquema D.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	124
IV.14.1:	Esquema D.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	128
IV.15.1:	Esquema E.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	132

IV.15.2:	Ley de cierre de la válvula a.....	134
IV.15.3:	Ley de cierre de la válvula b.....	134
IV.15.4:	Ley de cierre de la válvula c.....	134
IV.16.1:	Esquema E.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	163
IV.17.1:	Esquema E.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.....	169

INDICE DE TABLAS

Tabla No.	Descripción	Pág.
IV.3.1:	Caso A.1 Modos de operación, parámetros geométricos y condiciones de operación en régimen estacionario.....	40
IV.3.2:	Caso A.1 Alturas máximas obtenidas en la válvula a.....	45
IV.4.1:	Caso A.2 Modos de operación, parámetros de la válvula de alivio y condiciones de operación en régimen estacionario.....	46
IV.5.1:	Caso A.3 Modos de operación y parámetros geométricos.....	49
IV.5.2:	Caso A.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	50
IV.6.1:	Caso B.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).....	53
IV.6.2:	Caso B.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	54
IV.6.3:	Caso B.1 Alturas máximas obtenidas en la válvulas.....	64
IV.7.1:	Caso B.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.....	65
IV.7.2:	Caso B.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	65
IV.8.1:	Caso B.3 Modos de operación, longitud del by-pass.....	69
IV.8.2:	Caso B.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	69
IV.9.1:	Caso C.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).....	72
IV.9.2:	Caso C.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	74
IV.9.3:	Caso C.1 Alturas máximas obtenidas en las válvulas.....	101
IV.10.1:	Caso C.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.....	103
IV.10.2:	Caso C.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	103
IV.11.1:	Caso C.3 Modos de operación, longitud del by-pass.....	108
IV.11.2:	Caso C.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	108

IV.12.1:	Caso D.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).....	112
IV.12.2:	Caso D.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	113
IV.12.3:	Caso D.1 Alturas máximas obtenidas en la válvulas.....	123
IV.13.1:	Caso D.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.....	124
IV.13.2:	Caso D.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	124
IV.14.1:	Caso D.3 Modos de operación, longitud del by-pass.....	128
IV.14.2:	Caso D.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	128
IV.15.1:	Caso E.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).....	132
IV.15.2:	Caso E.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	134
IV.15.3:	Caso E.1 Alturas máximas obtenidas en las válvulas.....	161
IV.16.1:	Caso E.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.....	163
IV.16.2:	Caso E.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	163
IV.17.1:	Caso E.3 Modos de operación, longitud del by-pass.....	169
IV.17.2:	Caso E.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.....	169

INDICE DE GRAFICOS

Gráfica No.	Descripción	Pág.
III.2.1:	Respuesta de una tubería simple al cierre de válvula.....	35
IV.3.1:	Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a. (L1=600 m, D1= 0.5 m).....	41
IV.3.2:	Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a. (L1=600 m, D1= 0.25 m).....	41
IV.3.3:	Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a. (L1=1200 m, D1= 0.5 m).....	42
IV.3.4:	Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a. (L1=1200 m, D1=0.25 m).....	42
IV.4.1:	Esquema A.2: Variación de presión en la válvula a.....	47
IV.4.2:	Esquema A.2: Variación de caudal en la válvula a.....	47
IV.5.1:	Esquema A.3: Variación de presión en la válvula a.....	51
IV.5.2:	Esquema A.3: Variación de presión en la válvula a.....	51
IV.6.1:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando).....	56
IV.6.2:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b. (Todas las válvulas operando).....	56
IV.6.3:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente cerrada).....	57
IV.6.4:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente cerrada).....	57

IV.6.5:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente abierta).....	58
IV.6.6:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente abierta).....	58
IV.6.7:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente cerrada).....	59
IV.6.8:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente cerrada).....	59
IV.6.9:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente abierta).....	60
IV.6.10:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente abierta).....	60
IV.6.11:	Esquema B.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación (Todas las válvulas operando).....	61
IV.7.1:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.....	66
IV.7.2:	Esquema B.1: Variación de caudal en la válvula a.....	66
IV.7.3:	Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.....	67
IV.7.4:	Esquema B.1: Variación de caudal en la válvula b.....	67
IV.8.1:	Esquema B.3: Variación de presión en la válvula a.....	70
IV.8.2:	Esquema B.3: Variación de presión en la válvula b.....	70
IV.9.1:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando).....	76
IV.9.2:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.	

	(Todas las válvulas operando).....	76
IV.9.3:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Todas las válvulas operando).....	77
IV.9.4:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	77
IV.9.5:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	78
IV.9.6:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	78
IV.9.7:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	79
IV.9.8:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	79
IV.9.9:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	80
IV.9.10:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	80
IV.9.11:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	81
IV.9.12:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	81
IV.9.13:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y c totalmente abiertas).....	82
IV.9.14:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.	

	(Válvulas a y c totalmente abiertas).....	82
IV.9.15:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y c totalmente abiertas).....	83
IV.9.16:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	83
IV.9.17:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	84
IV.9.18:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	84
IV.9.19:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	85
IV.9.20:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	85
IV.9.21:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	86
IV.9.22:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente cerrada).....	86
IV.9.23:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente cerrada).....	87
IV.9.24:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula a totalmente cerrada).....	87
IV.9.25:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente abierta).....	88
IV.9.26:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.	

	(Válvula a totalmente abierta).....	88
IV.9.27:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula a totalmente abierta).....	89
IV.9.28:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente cerrada).....	89
IV.9.29:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente cerrada).....	90
IV.9.30:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula b totalmente cerrada).....	90
IV.9.31:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente abierta).....	91
IV.9.32:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente abierta).....	91
IV.9.33:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula b totalmente abierta).....	92
IV.9.34:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula c totalmente cerrada).....	92
IV.9.35:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula c totalmente cerrada).....	93
IV.9.36:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula c totalmente cerrada).....	93
IV.9.37:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula c totalmente abierta).....	94
IV.9.38:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.	

	(Válvula c totalmente abierta).....	94
IV.9.39:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula c totalmente abierta).....	95
IV.9.40:	Esquema C.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación (Todas las válvulas operando).....	95
IV.10.1:	Esquema C.2: Variación de presión en la válvula a.....	104
IV.10.2:	Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula a.....	104
IV.10.3:	Esquema C.2: Variación de presión en la válvula b.....	105
IV.10.4:	Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula b.....	105
IV.10.5:	Esquema C.2: Variación de presión en la válvula c.....	106
IV.10.6:	Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula c.....	106
IV.11.1:	Esquema C.3: Variación de presión en la válvula a.....	109
IV.11.2:	Esquema C.3: Variación de presión en la válvula b.....	109
IV.11.3:	Esquema C.3: Variación de presión en la válvula c.....	110
IV.12.1:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando).....	115
IV.12.2:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula b. (Todas las válvulas operando).....	115
IV.12.3:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente cerrada).....	116
IV.12.4:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente cerrada).....	116
IV.12.5:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente abierta).....	117

IV.12.6:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente abierta).....	117
IV.12.7:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente cerrada).....	118
IV.12.8:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente cerrada).....	118
IV.12.9:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente abierta).....	119
IV.12.10:	Esquema D.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente abierta).....	119
IV.12.11:	Esquema D.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación (Válvula b totalmente cerrada).....	120
IV.13.1:	Esquema D.2: Variación de presión en la válvula a.....	125
IV.13.2:	Esquema D.2: Variación de caudal en la válvula a.....	125
IV.13.3:	Esquema D.2: Variación de presión en la válvula b.....	126
IV.13.4:	Esquema D.2: Variación de caudal en la válvula b.....	126
IV.14.1:	Esquema D.3: Variación de presión en la válvula a.....	129
IV.14.2:	Esquema D.3: Variación de presión en la válvula a.....	129
IV.14.3:	Esquema D.3: Variación de presión en la válvula b.....	130
IV.15.1:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando).....	136
IV.15.2:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Todas las válvulas operando).....	136
IV.15.3:	Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.	

	(Todas las válvulas operando).....	137
IV.15.4:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	137
IV.15.5:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	138
IV.15.6:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas b y c totalmente cerradas).....	138
IV.15.7:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	139
IV.15.8:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	139
IV.15.9:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas b y c totalmente abiertas).....	140
IV.15.10:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	140
IV.15.11:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	141
IV.15.12:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	141
IV.15.13:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y c totalmente abiertas).....	142
IV.15.14:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y c totalmente abiertas).....	142
IV.15.15:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c.	

	(Válvulas a y c totalmente abiertas).....	143
IV.15.16:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	143
IV.15.17:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	144
IV.15.18:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y b totalmente cerradas).....	144
IV.15.19:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	145
IV.15.20:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	145
IV.15.21:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y b totalmente abiertas).....	146
IV.15.22:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente cerrada).....	146
IV.15.23:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente cerrada).....	147
IV.15.24:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula a totalmente cerrada).....	147
IV.15.25:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula a totalmente abierta).....	148
IV.15.26:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula a totalmente abierta).....	148
IV.15.27:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c.	

	(Válvula a totalmente abierta).....	149
IV.15.28:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente cerrada).....	149
IV.15.29:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente cerrada).....	150
IV.15.30:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula b totalmente cerrada).....	150
IV.15.31:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula b totalmente abierta).....	151
IV.15.32:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente abierta).....	151
IV.15.33:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula b totalmente abierta).....	152
IV.15.34:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula c totalmente cerrada).....	152
IV.15.35:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula c totalmente cerrada).....	153
IV.15.36:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula c totalmente cerrada).....	153
IV.15.37:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula c totalmente abierta).....	154
IV.15.38:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula c totalmente abierta).....	154
IV.15.39:	Esquema E.1: Variación de presión en la válvula c.	

	(Válvula c totalmente abierta).....	155
IV.15.40:	Esquema E.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación. (Válvulas a y c totalmente cerradas).....	155
IV.16.1:	Esquema E.2: Variación de presión en la válvula a.....	164
IV.16.2:	Esquema E.2: Variación de caudal en la válvula a.....	164
IV.16.3:	Esquema E.2: Variación de presión en la válvula b.....	165
IV.16.4:	Esquema E.2: Variación de caudal en la válvula b.....	165
IV.16.5:	Esquema E.2: Variación de presión en la válvula c.....	166
IV.16.6:	Esquema E.2: Variación de caudal en la válvula c.....	166
IV.17.1:	Esquema E.3: Variación de presión en la válvula a.....	170
IV.17.2:	Esquema E.3: Variación de presión en la válvula b.....	170
IV.17.3:	Esquema E.3: Variación de presión en la válvula c.....	171

NOMENCLATURA Y SIGLAS

a	Velocidad de propagación de la onda elástica
A	Área transversal interna de la tubería
B	Constante adimensional
Cd	Coefficiente descarga orificio
Di	Diámetro interno de la tubería
De	Diámetro externo de la tubería
E	Módulo de elasticidad de la tubería (Módulo de Young)
e	Espesor de pared de la tubería
f	Factor de fricción
f	Onda de presión que se propaga en dirección +x
F	Onda de presión que se propaga en dirección -x
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura piezométrica
H _{set}	Altura piezométrica de seteo o apertura de la válvula de alivio.
H _{máx}	Altura piezométrica máxima alcanzada
H _{Jou}	Altura piezométrica calculada por Joukowsky
H _o	Altura piezométrica en régimen permanente
H _r	Altura piezométrica del reservorio
K	Módulo de compresibilidad del fluido
L	Longitud de la tubería
p	Presión
Q	Caudal

Qades	Caudal de descarga de la válvula de alivio
Qo	Caudal en régimen permanente
Re	Número de Reynolds
r	Factor de reflexión de onda
s	Factor de transmisión de onda
tc	tiempo de cierre de la válvula
t	Tiempo
T	Temperatura del fluido
V	Velocidad del fluido
Vo	Velocidad del fluido en régimen permanente
x	Distancia
τ	Numero adimensional representando el grado de obturación de la válvula
ρ	Densidad del fluido a la temperatura de operación
μ	Relación de Poisson
Xn.m	Modo de operación que representa el régimen de funcionamiento hidráulico del sistema de tuberías estudiado.
C.B.A	Cierre de válvula brusco, válvula al inicio totalmente abierta.
C.B.P	Cierre de válvula brusco, válvula al inicio parcialmente abierta.
C.P.A	Cierre de válvula progresivo, válvula al inicio totalmente abierta.
C.P.P	Cierre de válvula progresivo, válvula al inicio parcialmente abierta.
T.A	Válvula totalmente abierta.
T.C	Válvula totalmente cerrada.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas hidráulicos a presión están sujetos a cambios bruscos en sus condiciones hidráulicas debido a los requerimientos de operación típicos del sistema y a situaciones de emergencia. Estos cambios generan condiciones transitorias en el flujo que originan ondas de presión conocidas como Golpe de Ariete.

La evaluación por cálculo de la magnitud de la sobrepresión y de la variación en el tiempo de la misma ha constituido objeto de múltiples investigaciones analíticas, computacionales y/o experimentales. Además se han diseñados dispositivos de protección de las tuberías contra el Golpe de Ariete.

En el diseño de sistemas de tuberías nuevos el análisis de Golpe de Ariete permite determinar el tiempo y secuencia de cierre de las válvulas, el espesor y material de las tuberías y el rating de válvulas y accesorios, así como los dispositivos de alivio que requiera el sistema. Para sistemas de tuberías existentes, el análisis permite evaluar las modificaciones posibles y los sistemas de alivio requeridos.

El objetivo principal del presente trabajo de grado consiste en la elaboración de un programa computacional para el cálculo de la variación de la presión en régimen transitorio en una tubería principal que desemboca en varias ramificaciones alimentando usuarios con características operacionales distintas.

El Presente trabajo esta dividido en cuatro capítulos.

El primer capitulo esta consagrado a la descripción y explicación del fenómeno de golpe de ariete utilizando el caso de una tubería unifilar provista de una válvula. Se incluyeron las ecuaciones diferenciales características del flujo transitorio en tuberías. Además se

mencionan seis de los principales métodos de cálculo de la sobrepresión generada por el golpe de ariete.

En el capítulo II se desarrolla el método de las Características que se basa en la integración aproximada de la ecuación de movimiento y continuidad; esta integración se realiza a lo largo de curvas características que surgen de una sustitución que convierte al sistema de ecuaciones de derivadas parciales en un sistema de ecuaciones de derivadas totales. También se formulan las distintas condiciones de fronteras características a los casos estudiados y dispositivos de atenuación utilizados en este trabajo.

Se han considerado tres casos principales: sistema hidráulico sin protección, el caso de la protección asegurada por una válvula de alivio y la versión que consiste en el uso de una tubería by-pass.

En el capítulo III; se explica la estructura del programa de cálculo de la presión en sistemas hidráulicos ramificados elaborado en FORTRAN, que sirvió para la cuantificación de los 191 casos analizados. La validación del programa se realizó utilizando un caso tomado del libro “Fluid Transients in System”, Wylie, B., Streeter, V. Y Suo, L. (1993).

En el capítulo IV , se describen cada uno de los sistemas de tuberías ramificadas estudiados, se presentan las características geométricas y físicas en distintas hipótesis de operación, comparando la eficacia de dos dispositivos de atenuación para el Golpe de Ariete. En este capítulo se analizó la influencia de cada parámetro sobre la presión generada y además se acordó especial atención a la cuantificación de la influencia que tienen los ramales inactivos sobre el incremento de la sobrepresión en el sistema, como consecuencia de la reflexión y superposición de las ondas en el sistema hidráulico.

CAPITULO I

ECUACIONES BASICAS Y METODOS DE CALCULO DEL GOLPE DE ARIETE.

I.1 GENERALIDADES

El fenómeno de Golpe de Ariete es ocasionado por la transformación de energía cinética y deformación del fluido en energía de presión o viceversa. Estas transformaciones generan ondas elásticas que se manifiestan como variaciones en la presión y velocidad del flujo, y en las propiedades del fluido, y viajan a lo largo de la tubería con velocidad cercana a la del sonido.

Estas ondas se originan en un sistema de tuberías cuando ocurren cambios repentinos en la operación de algún elemento, como cambios accidentales o planeados en la apertura de las válvulas, accionamiento o detención de unidades de bombeo o cambios en el nivel de tanques o recipientes a presión.

Las ondas de presión pueden ser positivas (sobrepresiones) o negativas (depresiones). Las sobrepresiones originadas pueden aumentar la presión total interna hasta llegar a superar la presión máxima admisible, lo que puede ocasionar daños mecánicos graves a las tuberías y accesorios. Las ondas negativas pueden disminuir la presión total hasta generar cavitación,

separación de la columna de líquido o el colapso de la tubería por efecto de la presión externa.

I.2 ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

La ecuación de movimiento o segunda ley de Newton establece, dicho en términos simples, que la sumatoria de las fuerzas externas aplicadas a un cuerpo másico son equivalentes al cambio de su cantidad de movimiento, esto es la derivada de la cantidad de masa por velocidad, como en este caso la masa no varia, queda masa por la derivada en el tiempo de la velocidad, es decir la aceleración.

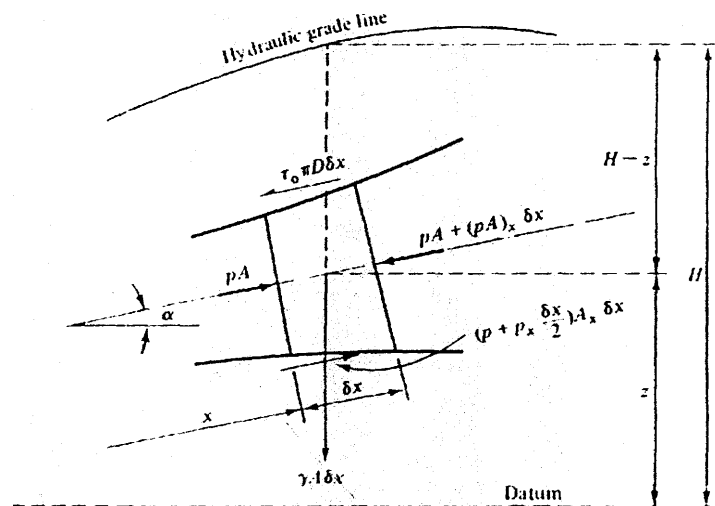


Figura No. I.2.1: Diagrama de cuerpo libre para la aplicación de la ecuación de movimiento.

Al aplicar la segunda ley de Newton al diferencial de fluido en estudio de la figura No.I.2.1 obtenemos:

$$pA - [pA + (pA)_x \delta_x] + \left(p + p_x \frac{\delta_x}{2} \right) A_x \delta_x - \tau_0 \pi D \delta_x - \rho g A \sin \alpha = \rho A \delta_x \dot{V} \quad \text{ec. I.2.1}$$

Eliminando los términos que contienen δ_x^2 :

$$p_x A + \tau_0 \pi D + \rho g A \sin \alpha + \rho A \dot{V} = 0 \quad \text{ec. I.2.2}$$

En flujo transitorio τ_0 se considera igual que en flujo en estado estacionario. En términos del factor de fricción de Darcy-Weisbach:

$$\tau_0 = \frac{f \rho V |V|}{8} \quad \text{ec. I.2.3}$$

Esta ecuación sale de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$\Delta p = \frac{\rho f L V^2}{D} \frac{1}{2} \quad \text{ec. I.2.4}$$

De un balance de fuerzas en flujo estacionario.

$$\Delta p \frac{\pi D^2}{4} = \tau_0 \pi D L \quad \text{ec. I.2.5}$$

Luego de realizar diferentes sustituciones, asumiendo un fluido de densidad constante, simplificando términos para flujos con números de Mach bajos y además reemplazando p por la altura piezométrica H , obtenemos la siguientes expresión:

$$g H_x + V_t + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad \text{ec. I.2.6}$$

I.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad establece en términos simples que sobre un volumen de control dado la sumatoria algebraica de las entradas y salidas de masa sumado a la acumulación interna de fluido es igual a la generación de masa interna. En este caso nuestro volumen de

control esta representado por el diferencial de fluido. Dentro de este volumen de control no hay generación de masa, por lo tanto la ecuación de continuidad queda al analizar la figura No. I.3.1:

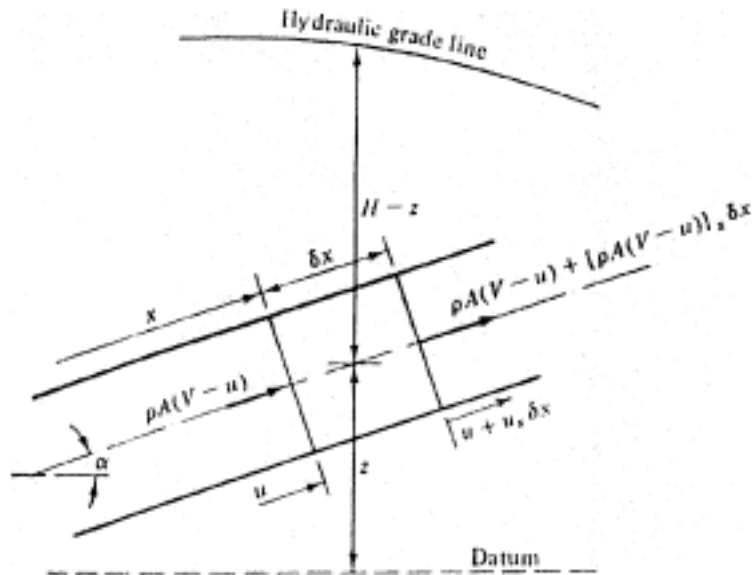


Figura No. I.3.1: Volumen de control para el desarrollo de la ecuación de continuidad.

$$-[\rho A(V - u)]_x \delta_x = \frac{D'}{Dt}(\rho A \delta_x) \quad \text{ec. I.3.1}$$

$$\frac{D'}{Dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{ec. I.3.2}$$

El tiempo de incremento de la longitud δ_x del volumen de control esta dado por:

$$\frac{D'}{Dt} \delta_x = u_x \delta_x \quad \text{ec. I.3.3}$$

Por expansiones parciales y el uso de la ecuación anterior tenemos:

$$(\rho AV)_x - (\rho Au)_x + \frac{D'}{Dt}(\rho A) + \rho Au_x = 0 \quad \text{ec. I.3.4}$$

Simplificando, esta ecuación puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\rho A V_x + V(\rho A)_x + (\rho A)_t = 0 \quad \text{ec. I.3.5}$$

Los últimos dos términos representan la derivada de ρA con respecto al movimiento de una partícula.

$$\frac{1}{\rho A} \frac{D}{Dt} (\rho A) + V_x = 0 \quad \text{ec. 1.3.6}$$

en donde

$$\frac{D}{Dt} = V \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{ec. 1.3.7}$$

Sustituyendo tenemos:

$$\frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{\rho}}{\rho} + V_x = 0 \quad \text{ec. 1.3.8}$$

Luego de realizar diferentes asunciones, simplificaciones y sustituir la velocidad de onda a , obtenemos la siguiente ecuación:

$$H_t + \frac{a^2 V_x}{g} = 0 \quad \text{ec. 1.3.9}$$

I.4 SOLUCIONES DE RIEMANN AL GOLPE DE ARIETE

Las ecuaciones fundamentales del régimen transitorio en tuberías se obtienen aplicando la ecuación de continuidad y de movimiento a un elemento de fluido, tomando en cuenta la variabilidad temporal de la presión y velocidad del flujo, y la elasticidad del fluido y de la tubería (la ecuación de Bernoulli no puede aplicarse porque el fluido se considera compresible). Las variables dependientes son la altura de presión (altura piezométrica) H y

la velocidad promedio en una sección transversal V . Las variables independientes son la distancia x y el tiempo t ; con lo que se tiene $H = H(x,t)$ y $V = V(x,t)$.

Estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales cuya solución analítica es excesivamente compleja, por lo que se recurre a procedimientos numéricos. La simplificación de estas ecuaciones conlleva a dos ecuaciones llamadas ecuaciones fundamentales del Golpe de Ariete, cuyas soluciones son:

$$H - H_o = F\left(t + \frac{x}{a}\right) + f\left(t - \frac{x}{a}\right) \quad \text{ec. I.4.1}$$

$$V - V_o = -\frac{g}{a} \left[F\left(t + \frac{x}{a}\right) - f\left(t - \frac{x}{a}\right) \right] \quad \text{ec. I.4.2}$$

Para obtener estas soluciones se despreció el efecto de la fricción y la variación en la velocidad del fluido a lo largo de la tubería, además de asumir que la velocidad de la onda a es mucho mayor que la velocidad del fluido en régimen permanente.

De las ecuaciones I.4.1 y I.4.2 se deduce que, dimensionalmente, F es una altura de presión medida en las mismas unidades que H y que se desplaza inalterada con una velocidad a en el sentido contrario al movimiento del fluido. Similarmente, f representa una onda de presión que se propaga en sentido contrario a F .

La ecuación I.4.1 implica que, para un tiempo t y un punto en la tubería de coordenada x , el aumento de presión es igual a la suma de las ondas de presión F y f , las cuales se propagan a lo largo de la tubería con velocidad constante a . Cuando una onda F “se encuentra” con una onda f , ninguna se atenúa o cambia su forma; son sus efectos superpuestos los que determinan las condiciones transitorias de flujo (presión y velocidad), en esa sección de la

tubería. La ecuación I.4.2 es una relación entre la magnitud de estas ondas de presión y el cambio en velocidad que ocurre en una determinada sección de la tubería.

I.5 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELÁSTICAS

I.5.1 Velocidad de Propagación de la Onda

Los cambios localizados que se producen en la presión y velocidad del flujo se propagan a lo largo de la tubería con una velocidad cercana a la velocidad del sonido en ese medio, pero afectada por la elasticidad de la tubería. La velocidad de propagación a de la onda elástica en tuberías que transportan líquidos está determinada por las propiedades del fluido, por la geometría y las propiedades elásticas de la tubería, y viene dada por:

$$a = \frac{K_{eff}}{\rho_m} \quad \text{ec. I.5.1}$$

$$\rho_m = y\rho_g + (1-y)\rho_f \quad \text{ec. I.5.2}$$

$$K_{eff} = \frac{1}{\frac{1-y}{K_f} + \frac{y}{K_g} + \frac{DC'}{Ee}} \quad \text{ec. I.5.3}$$

I.5.2 Reflexión y Transmisión de Ondas

La magnitud y dirección de una onda de presión es modificada cada vez que se encuentra a su paso por la tubería con un elemento tal como un tanque, una válvula o con un cambio en las características y/o material de la tubería. A partir de las ecuaciones I.4.1 y I.4.2, de la

ecuación de continuidad y conociendo las condiciones de flujo que impone cada uno de estos elementos, puede determinarse la magnitud de las ondas transmitidas y reflejadas en función de la magnitud de la onda inicial.

En un tanque de altura constante H_o :

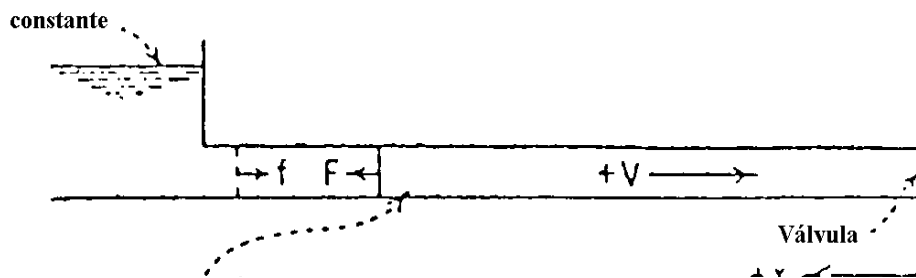


Figura No. I.5.1: Reflexión de la onda en un tanque de altura constante.

Como la altura H_o se mantiene constante:

$$F = -f \Rightarrow V - V_o = -\frac{2g}{a} F \left(t + \frac{L}{a} \right) \quad \text{ec. I.5.4}$$

Esta expresión implica que cuando una onda F alcanza el extremo aguas arriba de la tubería, se genera una onda f de la misma magnitud pero de signo contrario, lo que ocasiona que el cambio en velocidad sea el doble que en otros puntos de la tubería.

En un extremo cerrado:



Figura No. I.5.2: Reflexión de la onda en un extremo cerrado.

Como en el extremo cerrado $V_o = 0$:

$$F = f \Rightarrow H - H_o = 2F \left(t + \frac{L}{a} \right) \quad \text{ec. I.5.5}$$

Esta expresión quiere decir que en un extremo cerrado la onda de presión se refleja completamente sin cambio de signo, y su magnitud es el doble de la intensidad de la onda inicial F .

En un cambio en el área de la sección transversal

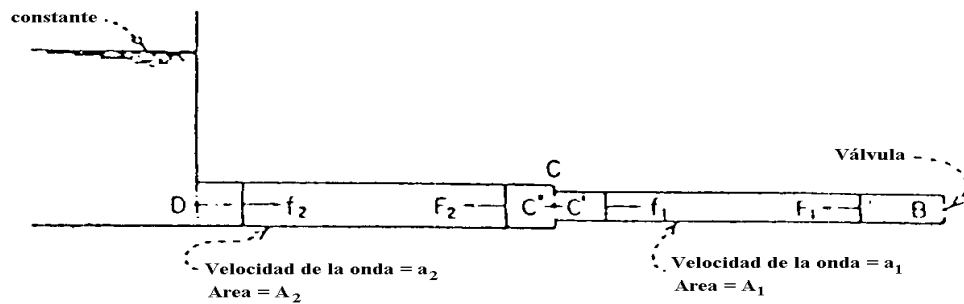


Figura No. I.5.3: Transmisión y reflexión de la onda en un cambio de sección transversal.

Si la onda se transmite de la tubería 1 a la tubería 2, se tiene:

$$F_2 = sF_1 \quad \text{ec. I.5.6}$$

$$f_1 = rF_1 \quad \text{ec. I.5.7}$$

donde:

$$s - r = 1 \quad \text{ec. I.5.8}$$

con:

$$s = \frac{2 \cdot A_1 / a_1}{A_1 / a_1 + A_2 / a_2} = \frac{2 \cdot a_2 \cdot D_1^2}{a_2 \cdot D_1^2 + a_1 \cdot D_2^2} \quad \text{ec. I.5.9}$$

$$r = \frac{A_1 / a_1 - A_2 / a_2}{A_1 / a_1 + A_2 / a_2} = \frac{a_2 \cdot D_1^2 - a_1 \cdot D_2^2}{a_2 \cdot D_1^2 + a_1 \cdot D_2^2} \quad \text{ec. I.5.10}$$

En el caso de un cambio de área en la sección transversal de la tubería, parte de la onda inicial es reflejada y parte es transmitida en la misma dirección, y sus magnitudes están determinadas por los factores de transmisión y reflexión de onda, s y r respectivamente.

En derivaciones a dos o más tuberías:

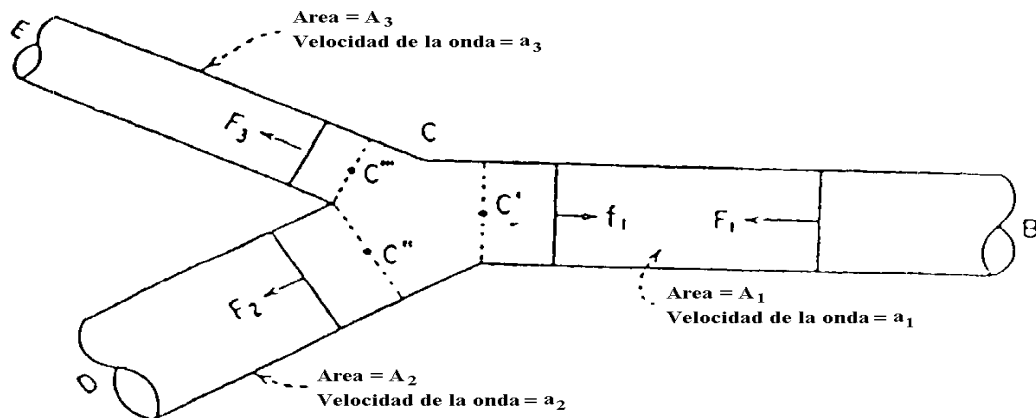


Figura No. I.5.4: Transmisión y reflexión de la onda en derivaciones.

De manera similar al caso anterior se tiene:

$$F_2 = F_3 = sF_1 \quad \text{ec. I.5.11}$$

$$f_1 = rF_1 \quad \text{ec. I.5.12}$$

donde:

$$s - r = 1 \quad \text{ec. I.5.13}$$

con:

$$s = \frac{2A_1/a_1}{A_1/a_1 + A_2/a_2 + A_3/a_3} = \frac{2 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot D_1^2}{a_2 \cdot a_3 \cdot D_1^2 + a_1 \cdot a_3 \cdot D_2^2 + a_1 \cdot a_2 \cdot D_3^2} \quad \text{ec. I.5.14}$$

$$r = \frac{A_1/a_1 - A_2/a_2 - A_3/a_3}{A_1/a_1 + A_2/a_2 + A_3/a_3} = \frac{a_2 \cdot a_3 \cdot D_1^2 - a_1 \cdot a_3 \cdot D_2^2 - a_1 \cdot a_2 \cdot D_3^2}{a_2 \cdot a_3 \cdot D_1^2 + a_1 \cdot a_3 \cdot D_2^2 + a_1 \cdot a_2 \cdot D_3^2} \quad \text{ec. I.5.15}$$

En el caso de una onda de presión que se encuentra con una derivación de la tubería, la magnitud de las ondas de presión transmitidas es la misma, sin importar las respectivas áreas transversales.

I.5.3 Cierre de una válvula

Las válvulas juegan un papel importante en los estudios de Golpe de Ariete, ya que el tiempo y la velocidad de cierre de las mismas son determinantes en la magnitud de las sobrepresiones generadas

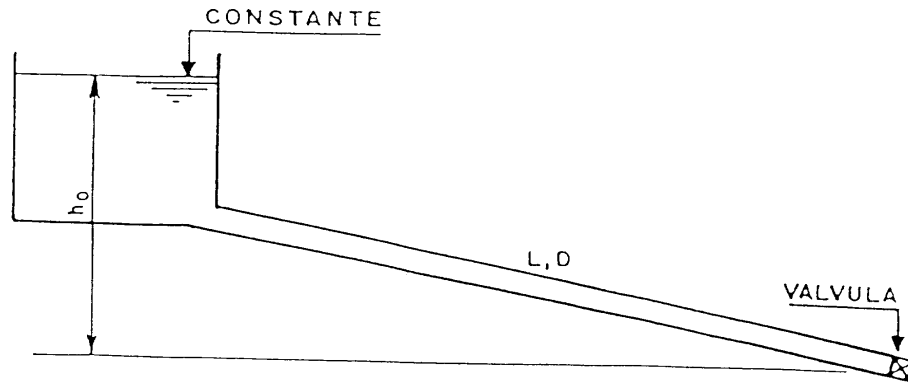


Figura No. I.5.5: Sistema con válvula que se cierra instantáneamente.

En el caso de cierre instantáneo de la válvula en el esquema mostrado en la figura I.5.5, se tiene que para el instante de cierre ($t = 0$), se genera una onda de presión positiva que se mueve aguas arriba frenando el fluido a sus pasos hasta lograr su reposo, comprimiéndolo y dilatando las paredes de la tubería. Cuando esta onda alcanza al extremo aguas arriba de la tubería ($t = L/a$), todo el fluido se encuentra bajo una presión adicional ΔH_0 .

Como la altura del tanque se mantiene constante, se tiene un desbalance en el momento en que llega la onda de presión, lo que ocasiona que el fluido comience a circular en sentido contrario. La presión en el fluido vuelve al valor que tenía antes del cierre de la válvula, la tubería recupera sus dimensiones originales y el fluido adquiere una velocidad V_0 en sentido contrario al original. Para $t = 2L/a$, la onda ha llegado a la válvula y se han restablecido las condiciones normales en la tubería con excepción de la velocidad del fluido V_0 que ahora tiene dirección hacia el tanque.

Como la válvula está cerrada no se puede mantener flujo a través de ella y por lo tanto se desarrolla una presión negativa $-\Delta H_0$. Esta onda de presión se propaga nuevamente aguas

arriba frenando el fluido y expandiéndolo debido a la baja presión, ocasionando que se contraigan las paredes de la tubería.

Cuando esta onda de presión negativa llega al extremo superior de la tubería ($t=3L/a$), el fluido se encuentra en reposo con una presión menor, en $-\Delta H_0$ de la que tenía antes del cierre. En estas condiciones se tiene nuevamente un desbalance en el tanque lo que provoca que el fluido comience a moverse otra vez hacia la válvula. En el momento que la onda llega a la válvula todas las condiciones son exactamente iguales a las que se tenían antes del cierre, ocurrido $4L/a$ seg antes.

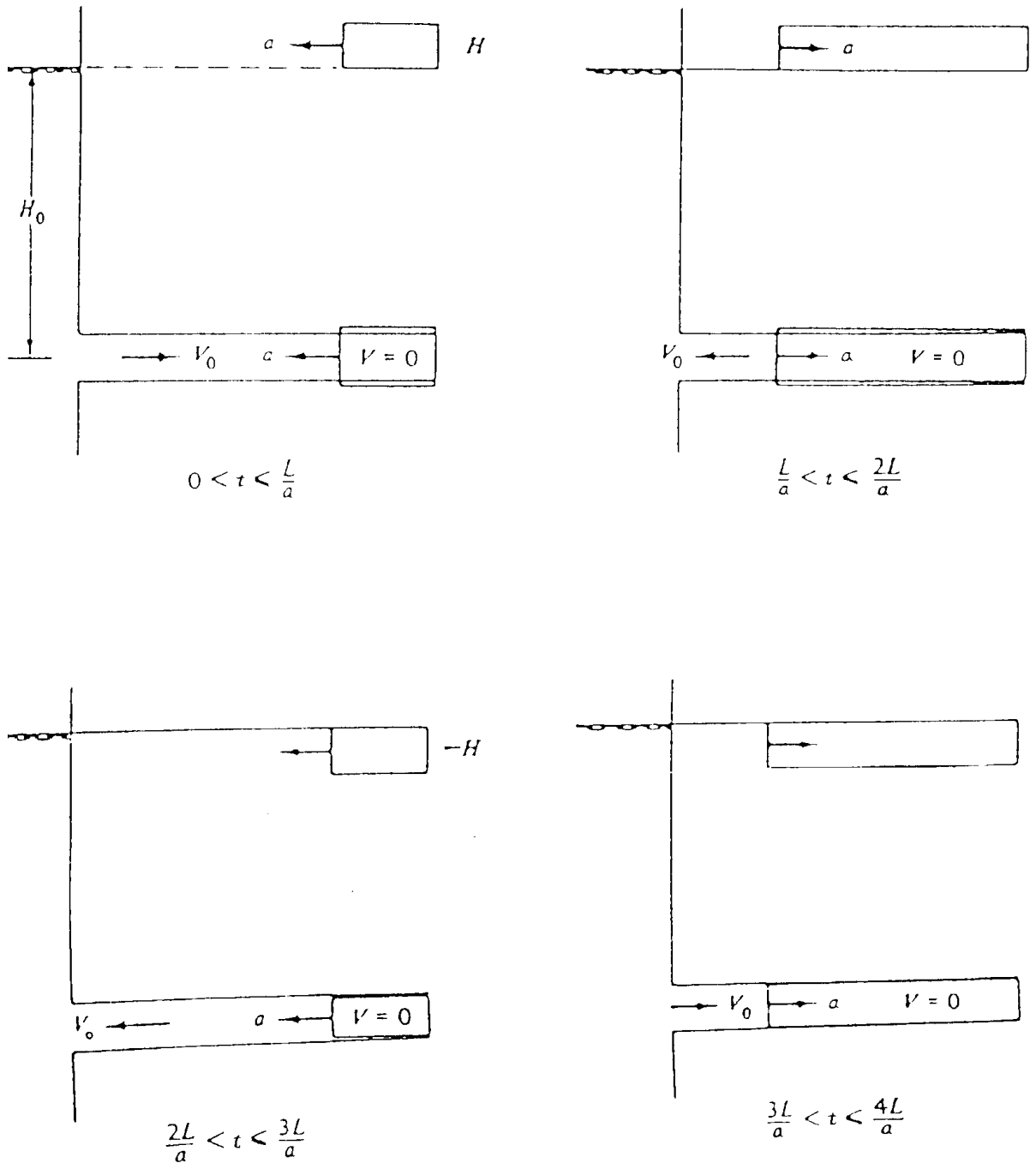


Figura No. I.5.6: Evolución de las condiciones de flujo durante el cierre instantáneo de una válvula.

Este proceso se repite cada $4L/a$ seg (ver figura I.5.7).

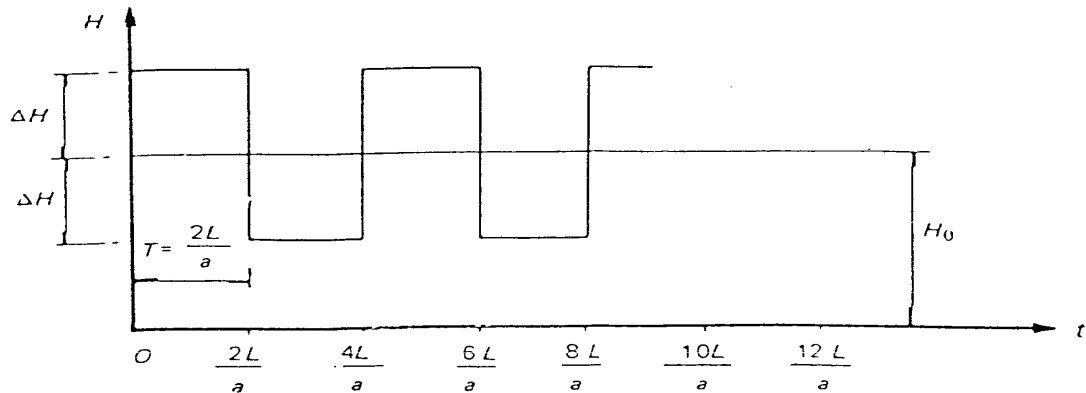


Figura No. I.5.7: Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula.

Los efectos de la fricción (no tomados en cuenta en la descripción anterior) y la elasticidad imperfecta tanto del fluido como de la tubería ocasionan que las oscilaciones se amortiguen hasta que el fluido alcance un estado de reposo permanente (ver figura I.5.8).

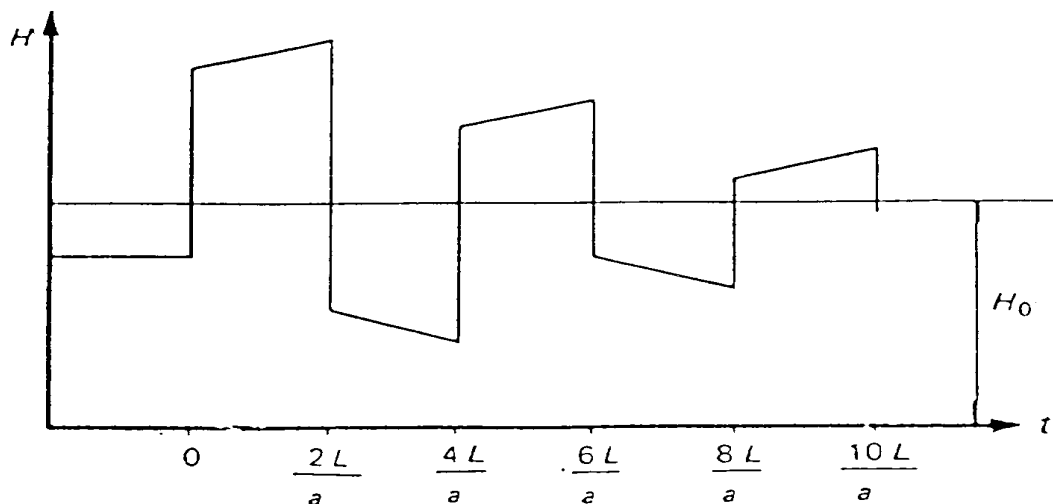


Figura No. I.5.8: Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula tomando en cuenta los efectos de la fricción.

Si el cierre de la válvula ocurre en un tiempo menor al tiempo de fase ($t=2L/a$), la onda reflejada no ha tenido tiempo de llegar a la válvula ($f=0$). Entonces, según las ecuaciones I.4.1 y I.4.2, la sobrepresión inicial es igual a

$$\Delta H_o = \frac{a}{g} \cdot V_o \quad \text{ec. I.5.16}$$

La ecuación I.5.16 es generalmente atribuida a Joukowsky (1898), aunque la literatura muestra que Menabrea (1858) realizó cálculos con esta ecuación.

La onda de presión negativa puede ocasionar que la presión en alguna sección de la tubería alcance el valor de la presión de vaporización y aparezcan burbujas de vapor en el fluido originándose la cavitación. Si el tamaño de estas cavidades o burbujas de vapor abarca la totalidad de la sección de la tubería, se presenta el fenómeno llamado separación de columna de líquido. Se forman entonces dos columnas de líquido separadas por una zona de vapor, por lo que la tubería queda sometida a la acción de la presión externa y a la posibilidad de una falla por colapso. Cuando la cavidad desaparece, el impacto entre las dos columnas de líquido pueden producir sobrepresiones de considerable magnitud.

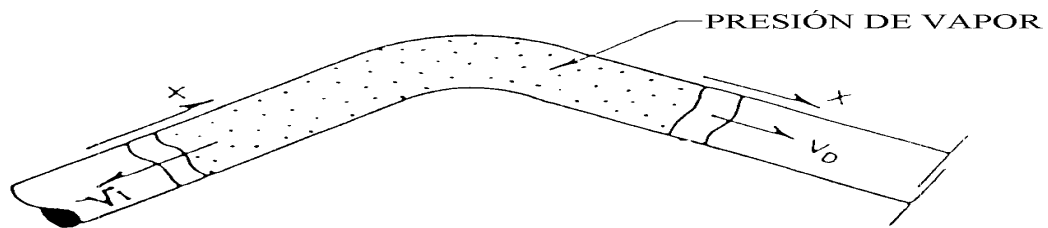


Figura No. I.5.9: Fenómeno de separación de la columna de líquida.

I.6 PRINCIPALES MÉTODOS DE CALCULO

Los métodos mas utilizados para resolver problemas de flujo hidráulico no permanente se basan en la resolución de expresiones derivadas de la ecuación de continuidad, movimiento y en algunos casos la ecuación de la energía. A continuación se hace un pequeño resumen de los métodos más comunes.

I.6.1 Método Aritmético

Las ecuaciones que se resuelven con este método desprecian la fricción y los efectos de la inclinación de la tubería. Incluyendo las condiciones de borde se logra obtener una tabla de valores de presión y velocidad para cada paso de tiempo, usualmente de L/a .

El desarrollo teórico del método es simple pero cuando se obtienen soluciones se debe tener presente que no se toma en cuenta la fricción.

I.6.2 Método Gráfico

El desarrollo teórico desprecia la fricción pero se pueden hacer correcciones para tomarla en cuenta. Se utilizan las ecuaciones de continuidad y de movimiento en derivadas parciales y una derivación de la ecuación de onda mecánica.

Siendo un método gráfico la solución obtenida permite una fácil visualización del fenómeno, pero al mismo tiempo muchas veces no puede aportar la precisión requerida, especialmente para sistemas complejos.

I.6.3 Método Algebraico

Es una particularización del método de las características. Las ecuaciones en diferencias finitas para las condiciones de borde se aplican para la longitud total de la tubería, se obtienen dos ecuaciones algebraicas no lineales que incluyen los efectos de la fricción para cada tubería.

El método provee resultados bastante precisos porque toma en cuenta la fricción no lineal sin embargo las ecuaciones pueden ser difíciles de manipular en algunos casos.

I.6.4 Método de las Ondas Físicas

El Método de las Ondas Físicas consiste en identificar en una sección determinada de la tubería, las ondas directas transmitidas y/o reflejadas en un periodo de tiempo suficientemente largo después de la aparición de la perturbación. A su momento dado, en esta sección, la presión será igual a la sumatoria de todas estas ondas más la presión nominal.

Este método permite calcular el flujo transitorio en las tuberías y posee un modelo matemático discreto sin ecuaciones diferenciales. El Método de las Ondas Físicas usualmente se utilizaba solamente para calcular el incremento de la presión en la primera fase, es decir, hasta que la onda reflejada regresaba a la válvula. En la tesis doctoral de H.H. Bernhart (1977) se hizo un progreso al calcular la intensidad de la onda de presión en la segunda fase poniendo en evidencia la dificultad del conteo del gran número de ondas reflejadas y transmitidas en una tubería con ramificaciones.

En los trabajos de S. Zarea y N. Vasiliu (1973,1974,1975), se generaliza el método de las Ondas Físicas y se desarrollan formulas generales que permiten calcular el valor de la

presión y el caudal en cualquier sección de la tubería unifilar, en serie, ramificadas, con o sin protección. El método es sencillo, fácil de entender y aplicar.

I.6.5 Método de la Impedancia

Este método resuelve casos de flujo oscilatorio. Se utiliza la teoría de las líneas eléctricas de transmisión. Se utiliza la fricción no lineal para el componente promedio del flujo y lineal para el componente oscilatorio.

El método se puede aplicar a sistemas complejos pudiendo determinar los periodos fundamental y armónico. Para las condiciones de borde se debe hacer un desarrollo de las series de Fourier para cada caso.

I.6.6 Método de las Características

Este método se basa en la transformación de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad, las cuales forman un par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. La conversión de estas ecuaciones en ecuaciones diferenciales ordinarias, resolviéndolas luego mediante un esquema explícito de diferencias finitas, permite hallar las condiciones de flujo generadas por el Golpe de Ariete.

CAPITULO II

METODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

II.1 ECUACIONES CARACTERÍSTICAS.

En esta sección se realizará el desarrollo de las ecuaciones empleadas para aplicar el método de las características, para ello es necesario partir de las ecuaciones desarrolladas en el análisis de cantidad de movimiento y continuidad.

$$L_1 = gH_x + V_t + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad \text{ec. II.1.1}$$

$$L_2 = H_t + \frac{a^2}{g} V_x = 0 \quad \text{ec. II.1.2}$$

Estas ecuaciones son combinadas linealmente usando un multiplicador desconocido λ .

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left(H_x \frac{g}{\lambda} + H_t \right) + \left(V_x \lambda \frac{a^2}{g} + V_t \right) + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{ec. II.1.3}$$

Si la variable independiente x es función de t , tenemos:

$$\frac{dH}{dt} = H_x \frac{dx}{dt} + H_t \quad \text{ec. II.1.4} \quad \frac{dV}{dt} = V_x \frac{dx}{dt} + V_t \quad \text{ec. II.1.5}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \quad \text{ec. II.1.6}$$

La ecuación II.1.3 se convierte en la ecuación diferencial ordinaria:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{ec. II.1.7}$$

La solución nos da dos posibles valores de λ :

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad \text{ec. II.1.8}$$

De la sustitución de estos valores obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$C^+: \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & \text{ec. II.1.9} \\ \frac{dx}{dt} = +a & \text{ec. II.1.10} \end{cases}$$

$$C^-: \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & \text{ec. II.1.11} \\ \frac{dx}{dt} = -a & \text{ec. II.1.12} \end{cases}$$

Es conveniente visualizar la solución en un plano xt , donde se observan las líneas “características” donde las ecuaciones II.1.9 y II.1.11 son válidas.

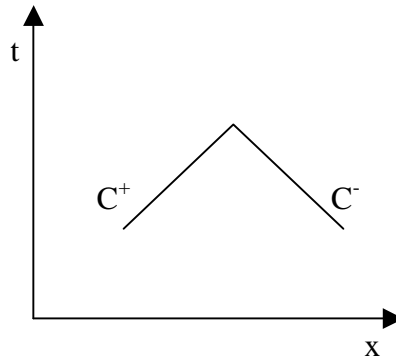


Figura No. II.1.1: Líneas características en el plano xt .

II.2 ECUACIONES POR DIFERENCIAS FINITAS.

Una tubería es dividida en N partes, cada parte de longitud Δx , por otra parte $\Delta t = \Delta x/a$.

Multiplicando por $adt/g = dx/g$ e integrando tenemos:

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = 0 \quad \text{ec. II.2.1}$$

La variación de Q en x debajo de la integral del último término es desconocida a priori, por lo tanto se introduce la siguiente aproximación:

$$\int_{x_A}^{x_P} Q^2 dx = Q^2 x \Big|_{x_A}^{x_P} - \int_{x_A}^{x_P} x dQ^2 = Q^2 x \Big|_{x_A}^{x_P} - 2 \int_{x_A}^{x_P} x Q dQ \approx Q_P |Q_A| (x_P - x_A) \quad \text{ec. II.2.2}$$

Haciendo lo mismo de B a P, se tienen las siguientes soluciones:

$$C^+: \quad H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_A| = 0 \quad \text{ec. II.2.3}$$

$$C^-: \quad H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_B| = 0 \quad \text{ec. II.2.4}$$

En un plano $x-t$, como se muestra en la figura II.2.1, se representan entonces las condiciones de flujo en cada uno de estos tramos para determinados intervalos de tiempo.

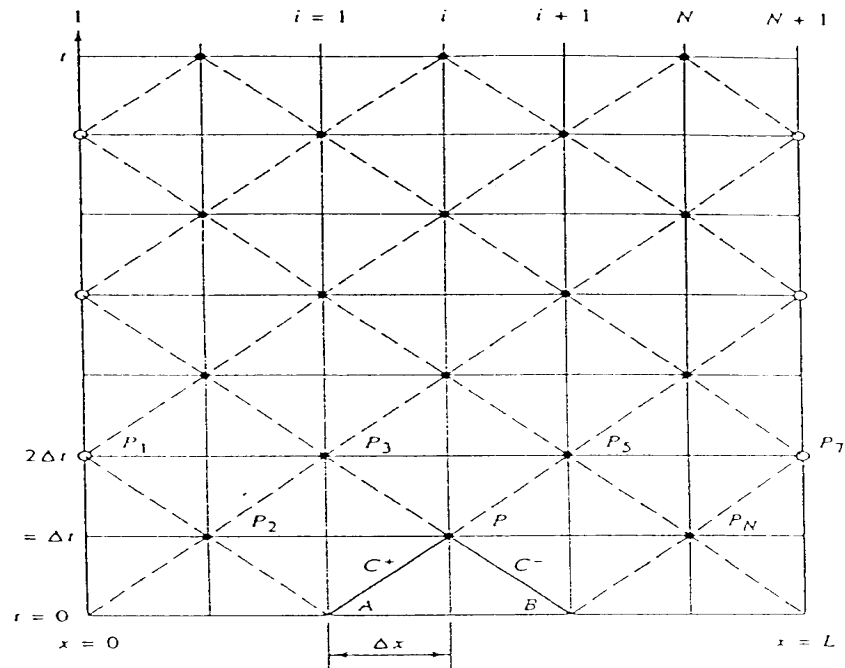


Figura No. II.2.1: Malla rectangular para la solución de las ecuaciones de características.

Para cada punto P del interior de la malla en una sección i , las dos ecuaciones de compatibilidad, válidas a lo largo de las dos líneas características C^+ y C^- son resueltas simultáneamente para las incógnitas Q_i y H_i , y pueden ser escritas como:

$$C^+ : H_i = C_P - B_P Q_i \quad \text{ec. II.2.5}$$

$$C^- : H_i = C_M - B_M Q_i \quad \text{ec. II.2.6}$$

donde los coeficientes C_P , B_P , C_M y B_M son constantes conocidas al momento de aplicar las ecuaciones, ya que dependen de las condiciones de flujo en el intervalo de tiempo anterior.

Vienen dados por:

$$C_P = H_{i-1} + B Q_{i-1} \quad \text{ec. II.2.7}$$

$$B_P = B + R |Q_{i-1}| \quad \text{ec. II.2.8}$$

$$C_M = H_{i+1} - B Q_{i+1} \quad \text{ec. II.2.9}$$

$$B_M = B + R |Q_{i+1}| \quad \text{ec. II.2.10}$$

Donde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{ec. II.2.11}$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad \text{ec. II.2.12}$$

La constante B , generalmente llamada impedancia característica de la tubería, depende de las propiedades físicas del fluido y la tubería. R es el coeficiente de resistencia de la tubería, donde el factor de fricción f puede ser una constante o ser ajustado durante los cálculos con el número de Reynolds local en cada tramo para cada intervalo tiempo.

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones II.2.5 y II.2.6 se obtiene:

$$H_i = \frac{C_P B_m + C_M B_P}{B_P + B_M} \quad \text{ec. II.2.13}$$

$$Q_l = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \quad \text{ec. II.2.14}$$

II.3 CONDICIONES DE FRONTERA PARA UNA TUBERÍA DE CARACTERÍSTICAS CONSTANTES.

Las condiciones de frontera en una tubería suministran ecuaciones auxiliares sobre el comportamiento de los elementos que constituyen estas condiciones (bombas, válvulas, etc.) permitiendo hallar las condiciones de flujo en los extremos de la tubería donde sólo hay disponible una de las dos ecuaciones de compatibilidad (C^+ o C^-).

En las condiciones de frontera el subíndice l indica las condiciones aguas arriba, y el subíndice NS se refiere a las condiciones aguas abajo.

II.3.1 Tanque de altura constante en el extremo aguas arriba.

$$H_l = H_R \quad \text{ec. II.3.1}$$

$$Q_l = \frac{H_l - C_M}{B_M} \quad \text{ec. II.3.2}$$

donde H_R es la elevación de la superficie del tanque desde el nivel de referencia.

II.3.2 Válvula en el extremo aguas abajo.

Si el nivel de referencia de elevación se toma en la válvula, entonces:

$$Q_{NS} = -B_p C_v + \sqrt{(B_p C_v)^2 + 2C_v C_p} \quad \text{ec. II.3.3}$$

$$H_{NS} = \frac{Q_{NS}^2 H_{op}}{(Q_{op} \tau)^2} \quad \text{ec. II.3.4}$$

donde: $C_v = \frac{(Q_{op} \tau)^2}{2H_{op}}$ ec. II.3.5

$$\tau = \sqrt{\frac{K_o}{K}} \quad \text{ec. II.3.6}$$

El coeficiente τ representa la apertura de la válvula como función del tiempo, donde K_o es el coeficiente de la válvula en estado estacionario. El coeficiente K de la válvula es función del grado de obturación Φ de la misma. La relación entre Φ y K debe ser obtenida del catálogo técnico de la válvula.

II.3.3 Extremo cerrado aguas abajo

$$Q_{NS} = 0 \quad \text{ec. II.3.7}$$

$$H_{NS} = C_p \quad \text{ec. II.3.8}$$

II.4 CONDICIONES DE FRONTERA PARA SISTEMAS COMPUESTOS.

Cuando hay más de una tubería con características distintas en un sistema, es necesario usar una notación de doble subíndice, donde el primero se refiere al número de la tubería y el segundo a la sección de dicha tubería.

En el tratamiento de sistemas dos o más tuberías es necesario que el incremento de tiempo Δt sea el mismo para todas las tuberías. Esto implica mucho cuidado en la selección de Δt y del número de tramos N_j en cada una de las J tuberías. En cada una de ellas se requiere que:

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j \cdot N_j} \quad \text{ec. II.4.1}$$

II.4.1 Conexión en serie.

Esta condición aplica para la unión de dos tuberías de diferente diámetro como para el caso de una tubería de diámetro constante y cambio en el espesor, suponiendo una altura de presión igual en la conexión.

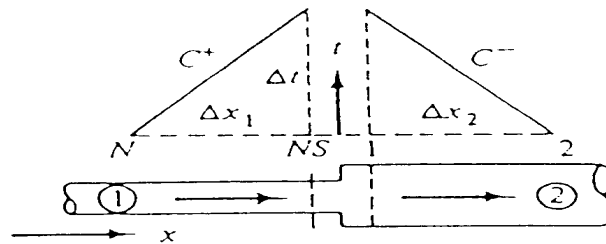


Figura No. II.4.1: Conexión en serie.

$$Q_{1,NS} = Q_{2,1} = \frac{C_{P1} - C_{M2}}{B_{P1} + B_{M2}} \quad \text{ec. II.4.2}$$

$$H_{1,NS} = H_{2,1} = \frac{B_{M2}C_{P1} + B_{P1}C_{M2}}{B_{P1} + B_{M2}} \quad \text{ec. II.4.3}$$

II.4.2 Unión general.

Una unión general es visualizada como un punto de conexión de elementos en un sistema (bombas, válvulas, tuberías etc.), en el cual hay dos variables: un flujo nodal Q_n , el cual puede ser cero (positivo cuando entra), y una presión nodal. Sólo se va a considerar unión o confluencia de tuberías. Hay dos casos entonces:

Presión constante o conocida en el nodo (el flujo es entonces una variable libre)

Flujo constante o conocido (la presión es la variable libre)

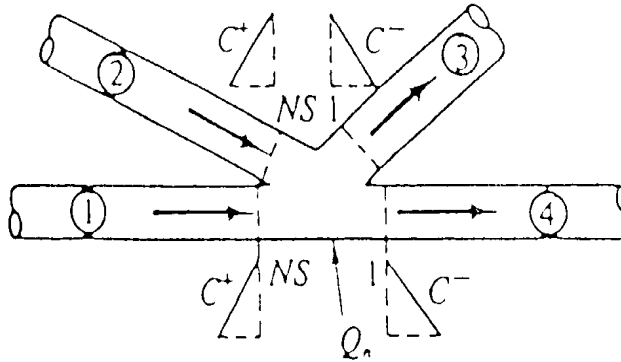


Figura No. II.4.2: Unión de tuberías.

La ecuación de continuidad aplicada en la unión:

$$\sum Q_p + Q_n = 0 \quad \text{ec. II.4.4}$$

donde Q_p representa la suma de los flujos de cada una de las tuberías. Si se desprecian las pérdidas menores, la ecuación de energía requiere una altura de presión común en cada elemento en la unión:

$$H = H_{1,NS} = H_{2,NS} = H_{3,I} = H_{4,I} \quad \text{ec. II.4.5}$$

Las ecuaciones de compatibilidad están disponibles para cada tubería: la ecuación II.2.5 para las tuberías 1 y 2, y la ecuación II.2.6 para las tuberías 3 y 4 (ver figura II.4.2).

Para confluencias donde la altura de presión es conocida (como un reservorio o un tanque a presión), los flujos en las tuberías se determinan directamente por el uso apropiado de las ecuaciones II.2.5 y II.2.6, y el flujo nodal es entonces calculado directamente por la ecuación II.4.2.

En una unión con flujo nodal conocido (que puede ser cero), las ecuaciones de compatibilidad se escriben de la siguiente manera:

$$Q_{1,NS} = \frac{C_{P1}}{B_{P1}} - \frac{H}{B_{P1}} \quad \text{ec. II.4.6}$$

$$Q_{2,NS} = \frac{C_{P2}}{B_{P2}} - \frac{H}{B_{P2}} \quad \text{ec. II.4.7}$$

$$-Q_{3,I} = \frac{C_{M3}}{B_{M3}} - \frac{H}{B_{M3}} \quad \text{ec. II.4.8}$$

$$-Q_{4,I} = \frac{C_{M4}}{B_{M4}} - \frac{H}{B_{M4}} \quad \text{ec. II.4.9}$$

La suma de estas ecuaciones da:

$$\sum Q_P = S_C - S_B H \quad \text{ec. II.4.10}$$

en la cual

$$S_C = \sum C_P / B_P + \sum C_M / B_M \quad \text{ec. II.4.11}$$

$$S_B = \sum \left(\frac{1}{B_P} \right) + \sum \left(\frac{1}{B_M} \right) \quad \text{ec. II.4.12}$$

En estas dos últimas ecuaciones se incluyen todas las tuberías conectadas a la unión.

Sustituyendo en la ecuación II.4.4 se obtiene una expresión de forma similar a las ecuaciones de compatibilidad para calcular la altura de presión común en el nodo:

$$H = C_n + B_n \cdot Q_n \quad \text{ec. II.4.13}$$

donde:

$$C_n = \frac{S_C}{S_B} \quad \text{ec. II.4.14}$$

$$B_n = I/S_B \quad \text{ec. II.4.15}$$

El flujo en cada tubería se halla entonces por las ecuaciones de compatibilidad II.4.6 a II.4.9.

II.5 CRITERIOS DE ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA

Para sistemas formados por una sola tubería de características constantes, el criterio de convergencia es el especificado por la ecuación:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{L}{a} \quad \text{ec. II.5.1}$$

En el caso de sistemas compuestos, se tiene que el incremento de tiempo debe ser el mismo para cada una de las tuberías, como lo indica la ecuación II.4.1:

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j \cdot N_j} \quad \text{ec. II.5.2}$$

Muchas veces es difícil que esta condición se verifique en todos los tramos, ya que las velocidades de propagación pueden resultar muy diferentes. Entonces puede utilizarse el llamado esquema numérico de los tiempos especificados, en el cual se especifica el intervalo de tiempo de la integración Δt sin que guarde una relación directa con el Δx y a . Sin embargo, los parámetros deben seleccionarse de tal manera que en cada una de las tuberías respeten la condición de convergencia numérica de Courant:

$$\Delta x_j \geq a_j \Delta t \quad \text{ec. II.5.3}$$

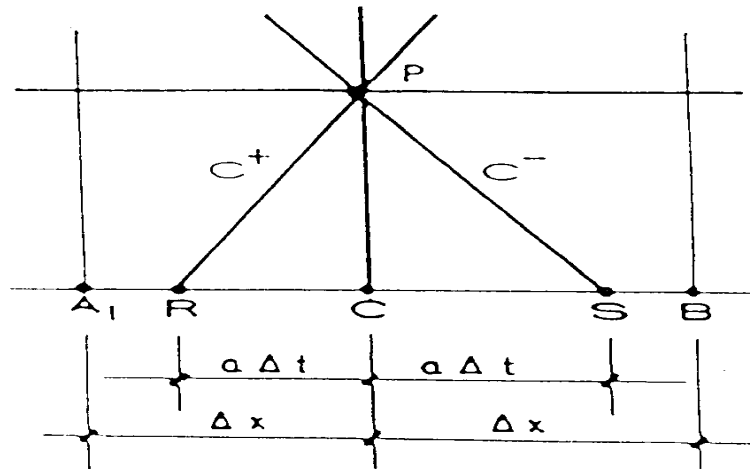


Figura No. II.5.1: Malla para un esquema de tiempos especificados.

En sistemas donde las pérdidas de energía debidas a los efectos viscosos son importantes (como es el caso de oleoductos largos), la aproximación usada para integrar el término de la fricción puede ocasionar inestabilidad. El criterio para obtener un resultado estable especifica que:

$$\frac{f\Delta x \bar{Q}}{2DAa} \leq 1 \quad \text{ec. II.5.4}$$

en la cual \bar{Q} representa un caudal promedio. Este criterio puede llevar a resultados incorrectos a pesar de garantizar estabilidad, por lo que se ha aceptado que valores alrededor de 0,15 producen resultados bastante exactos.

II.6 CONTROL Y ATENUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL GOLPE DE ARIETE.

La selección de los dispositivos apropiados para el control de los efectos del Golpe de Ariete no sólo necesitan de un estudio adecuado de su efectividad, sino de los costos iniciales y las características de mantenimiento que requiere, para así llevar a cabo la selección que tenga mejor respuesta ante el fenómeno y a su vez resulte factible económicamente.

II.6.1 Válvulas de Alivio

Estas válvulas son dispositivos diseñados de forma tal que cuando la presión en la tubería tiende a sobrepasar cierto valor prefijado, se acciona un mecanismo de apertura que permite una transformación de la energía de presión en energía cinética del flujo de descarga, aliviando así la sobrepresión.

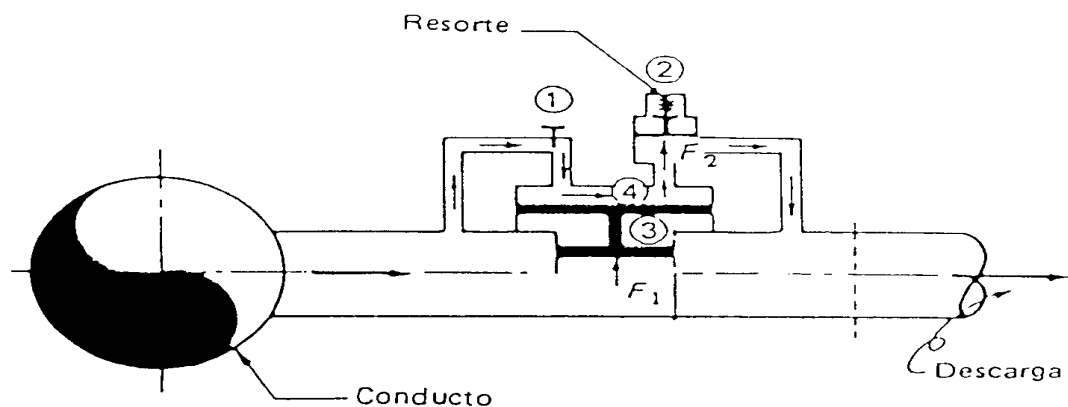


Figura II.6.1 Válvula de alivio de presión.

II.6.2 By-Pass

Es una configuración específica de tuberías que permite atenuar las ondas de presión mediante los fenómenos de transmisión y reflexión de ondas que ocurren en los nodos de confluencias de las tuberías.

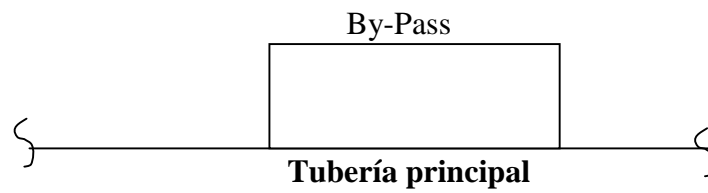


Figura II.6.2 Configuración By-Pass.

CAPITULO III

PROGRAMA DE CALCULO DE LA PRESIÓN EN SISTEMAS HIDRÁULICOS RAMIFICADOS.

III.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ELABORADO.

El programa de cálculo se realizó en lenguaje FORTRAN y está basado en las ecuaciones de compatibilidad del método de las Características. Este programa está orientado a la resolución de un sistema ramificado muy general con la finalidad de permitir su uso en aplicaciones posteriores. El programa está compuesto por las siguientes partes:

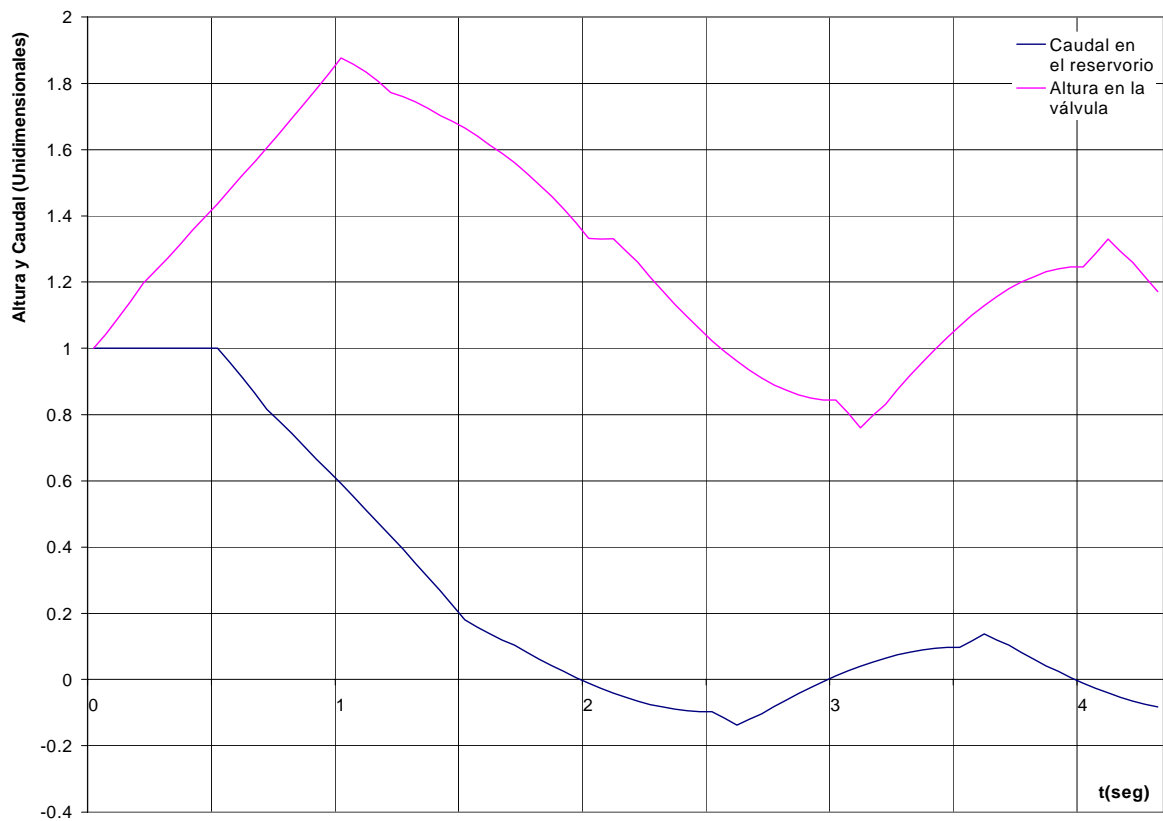
- Definición del sistema hidráulico.
- Propiedades del fluido de trabajo.
- Datos de cada tubería del sistema hidráulico.
- Cálculo de la velocidad de onda para cada tubería.
- Definición de condiciones de entrada y salida para cada tubería.
- Características de cada una de las válvulas.
- Cálculo de las condiciones en cada punto de las tuberías.
- Almacenamiento de resultados.

Es importante destacar que el programa permite fácilmente expandir las condiciones de borde en futuras aplicaciones.

III.2 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA ELABORADO.

La validación del programa consistió en calcular con el programa de calculo algún ejemplo obtenido de la literatura y de esta manera comparar los resultados obtenidos contra los resultados publicados.

Se utilizo el ejemplo 3-1 de la pagina 46 del libro “Fluid Transients in System”, Wylie, B., Streeter, V. Y Suo, L. (1993), con los mismos datos de entrada. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



Gráfica No. III.2.1: Respuesta de una tubería simple al cierre de válvula.

Comparando la gráfica III.2.1 con los resultados mostrados en el apéndice C, se evidencia claramente la exactitud y confiabilidad de los resultados obtenidos por el programa de cálculo.

CAPITULO IV

SISTEMAS DE TUBERÍAS RAMIFICADOS ESTUDIADOS

IV.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS.

Inicialmente se arranco con sistema basado en el ejemplo 3-1 de la página 46 del libro “Fluid Transients in System”, el cual luego fue modificándose para estudiar la influencia de los diversos parámetros geométricos y de operación y además se le anexaron ramales con la finalidad de estudiar la influencia de los mismos. Esto origino la creación de los siguientes grupos de casos:

- Casos A : Tubería simple.
 - Caso A.1: Tubería simple sin protección.
 - Caso A.2: Tubería simple con válvula de alivio.
 - Caso A.3: Tubería simple con by-pass.
- Casos B : Tubería con dos ramificaciones “largas”.
 - Caso B.1: Tubería con dos ramificaciones “largas” sin protección.
 - Caso B.2: Tubería con dos ramificaciones “largas” con válvula de alivio.
 - Caso B.3: Tubería con dos ramificaciones “largas” con by-pass.
- Casos C : Tubería con tres ramificaciones “largas”.
 - Caso C.1: Tubería con tres ramificaciones “largas” sin protección.
 - Caso C.2: Tubería con tres ramificaciones “largas” con válvula de alivio.
 - Caso C.3: Tubería con tres ramificaciones “largas” con by-pass.
- Casos D : Tubería con dos ramificaciones “cortas”.
 - Caso D.1: Tubería con dos ramificaciones “cortas” sin protección.

- Caso D.2: Tubería con dos ramificaciones “cortas” con válvula de alivio.
- Caso D.3: Tubería con dos ramificaciones “cortas” con by-pass.
- Casos E : Tubería con tres ramificaciones “cortas”.
 - Caso E.1: Tubería con tres ramificaciones “cortas” sin protección.
 - Caso E.2: Tubería con tres ramificaciones “cortas” con válvula de alivio.
 - Caso E.3: Tubería con tres ramificaciones “cortas” con by-pass.

Luego para cada caso se crearon diferentes modos de operación, en los cuales se modificaba la ley de cierre de las válvulas, el diámetro de orificio de las válvulas de alivio o los parámetros geométricos de los by-pass.

IV.2 CARACTERÍSTICAS GEOMETRICAS Y FÍSICAS DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS.

Para la selección de las características geométricas de la tubería, las ramificaciones y las válvulas y además la definición de los parámetros hidráulicos de operación, se tomo como base el ejemplo 3-1 del libro “Fluid Transients in Systems” de Wylie, E., Streeter, V. Y Suo L. (1993), con la finalidad de partir de una caso ya estudiado y de reconocida validez. Partiendo de aquí se empezaron a modificar cada una de las características del sistema y de esta manera estudiar su influencia en el comportamiento del sistema hidráulico. Cabe destacar que a petición del tutor prof. Stefan Zarea el accionamiento de las válvulas se limito al cierre de las mismas. Para todos los casos tenemos:

Fluido de trabajo: Agua @ 20 °C.

Presión de vapor: $P_{\text{vap}} = 2.34 \text{ kPa(abs.)}$.

Densidad: $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$

Modulo de elasticidad: $K = 220 \times 10^7 \text{ Pa}$.

Coefficiente de descarga de la válvula: $(C_d A)_0 = 0.009 \Rightarrow \tau = 0$.

Aceleración de la gravedad : $g = 9.806 \text{ m/s}^2$.

Material de las tuberías: acero al carbono, Schedule 40

Modulo de Young's: $E = 207 \times 10^6 \text{ kPa}$,

Relación de Poisson's: $\mu = 0.3$.

Diámetro interno: $D = 0.5 \text{ m} \Rightarrow$ espesor: $e = 0.015 \text{ m}$.

Diámetro interno: $D = 0.25 \text{ m} \Rightarrow$ espesor: $e = 0.009 \text{ m}$.

Altura del reservorio en régimen permanente : $H_r = 150 \text{ m}$.

Factor de fricción: $f = 0.018$

IV.3 CASO A.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN

IV.3.1 Parámetros y características operacionales del caso A.1.

El caso A.1 comprende un sistema hidráulico sencillo de un tanque, una tubería y una válvula. Los parámetros geométricos bases se toman del ejemplo 3-1 del libro “Fluid Transients in Systems” de Wylie, E., Streeter, V. Y Suo L. (1993), el cual esta representado en la gráfica No. IV.3.1. Para la gráfica No. IV.3.2 solo se modifico el diámetro a la mitad, en la gráfica No. IV.3.3 la longitud al doble y en la gráfica No. IV.3.4 se cambio tanto el diámetro como la longitud. Se utilizo para cada sistema cuatros modos de operación: Cierre de válvula brusco con válvula al inicio totalmente abierta, cierre de válvula brusco con válvula al inicio parcialmente abierta, cierre de válvula progresivo con válvula al inicio totalmente abierta y cierre de válvula progresivo con válvula al inicio parcialmente abierta.

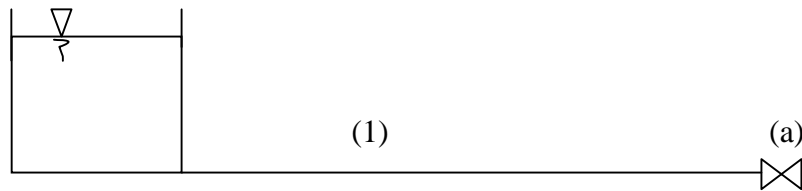


Figura No. IV.3.1: Esquema A.1: Sistema tanque, tubería y válvula.

Tabla No. IV.3.1: Caso A.1 Modos de operación, parámetros geométricos y condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Válvula a	D1 (m)	L1 (m)	tc (seg)	τ_i	Q01 (m ³ /s)	H0(a) (m)
A.1.1	C.B.A	0.5	600	0.0	1.0	0.4774	143.49
A.1.2	C.B.P	0.5	600	0.0	0.5	0.2427	148.32
A.1.3	C.B.A	0.25	600	0.0	1.0	0.3117	61.18
A.1.4	C.B.P	0.25	600	0.0	0.5	0.2091	110.05
A.1.5	C.B.A	0.5	1200	0.0	1.0	0.4674	137.52
A.1.6	C.B.P	0.5	1200	0.0	0.5	0.2414	146.67
A.1.7	C.B.A	0.25	1200	0.0	1.0	0.2471	38.43
A.1.8	C.B.P	0.25	1200	0.0	0.5	0.1858	86.91
A.1.9	C.P.A	0.5	600	4.0	1.0	0.4774	143.49
A.1.10	C.P.P	0.5	600	2.0	0.5	0.2427	148.32
A.1.11	C.P.A	0.25	600	4.0	1.0	0.3117	61.18
A.1.12	C.P.P	0.25	600	2.0	0.5	0.2091	110.05
A.1.13	C.P.A	0.5	1200	4.0	1.0	0.4674	137.52
A.1.14	C.P.P	0.5	1200	2.0	0.5	0.2414	146.67
A.1.15	C.P.A	0.25	1200	4.0	1.0	0.2471	38.43
A.1.16	C.P.P	0.25	1200	2.0	0.5	0.1858	86.91

Ley de cierre de la válvula a:

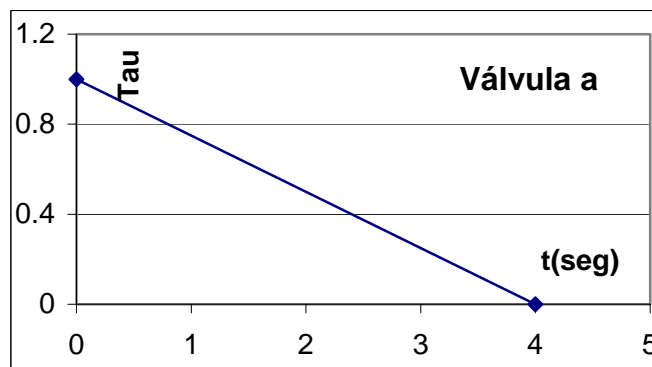


Figura No. IV.3.2: Ley de cierre de la válvula a.

IV.3.2 Resultados obtenidos en el caso A.1.

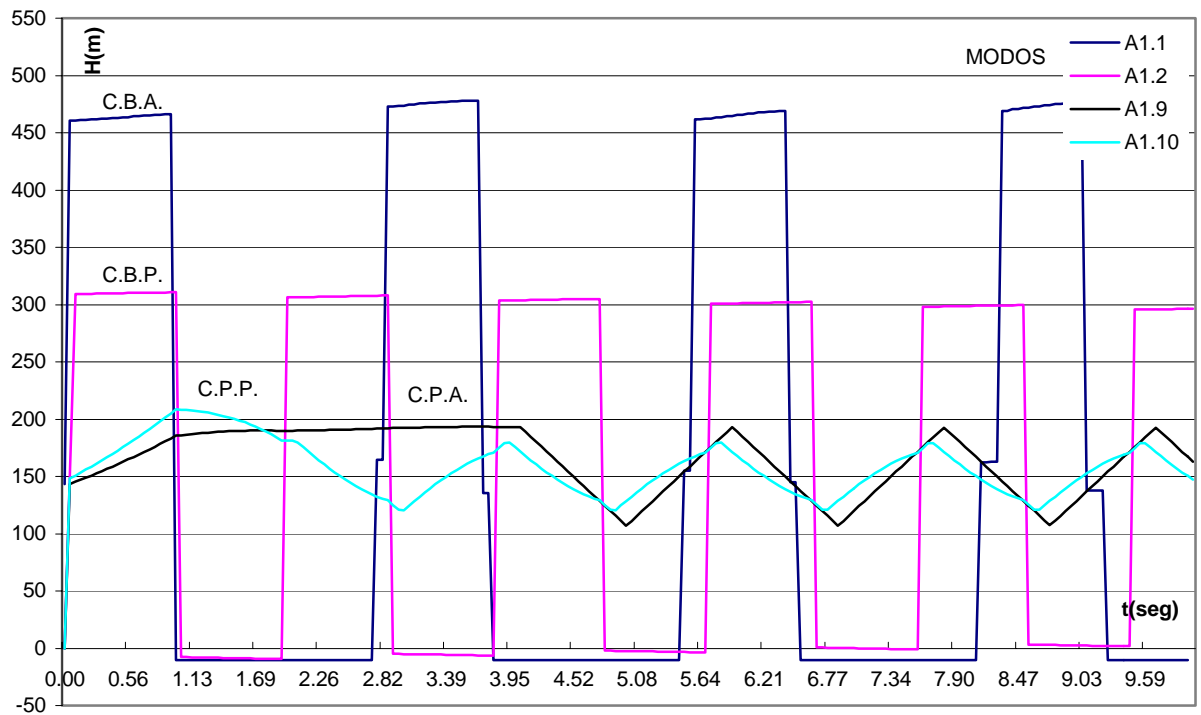


Gráfico No. IV.3.1: Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a.
(L1 = 600 m , D1 = 0.5 m)

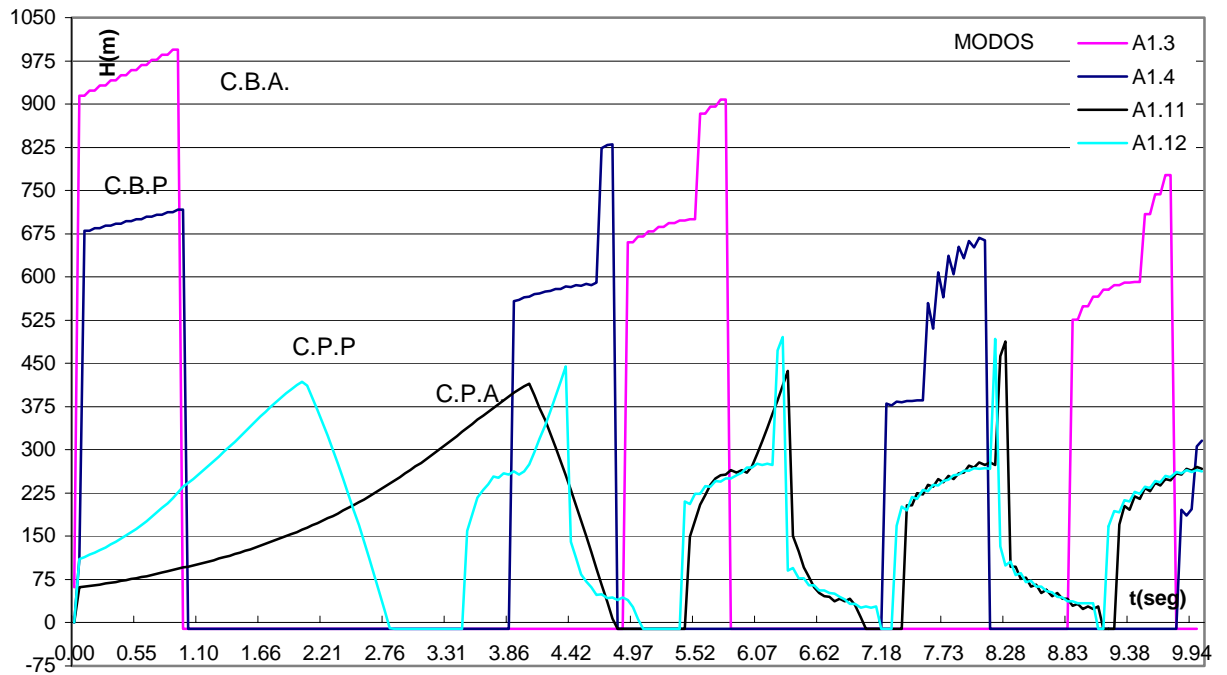
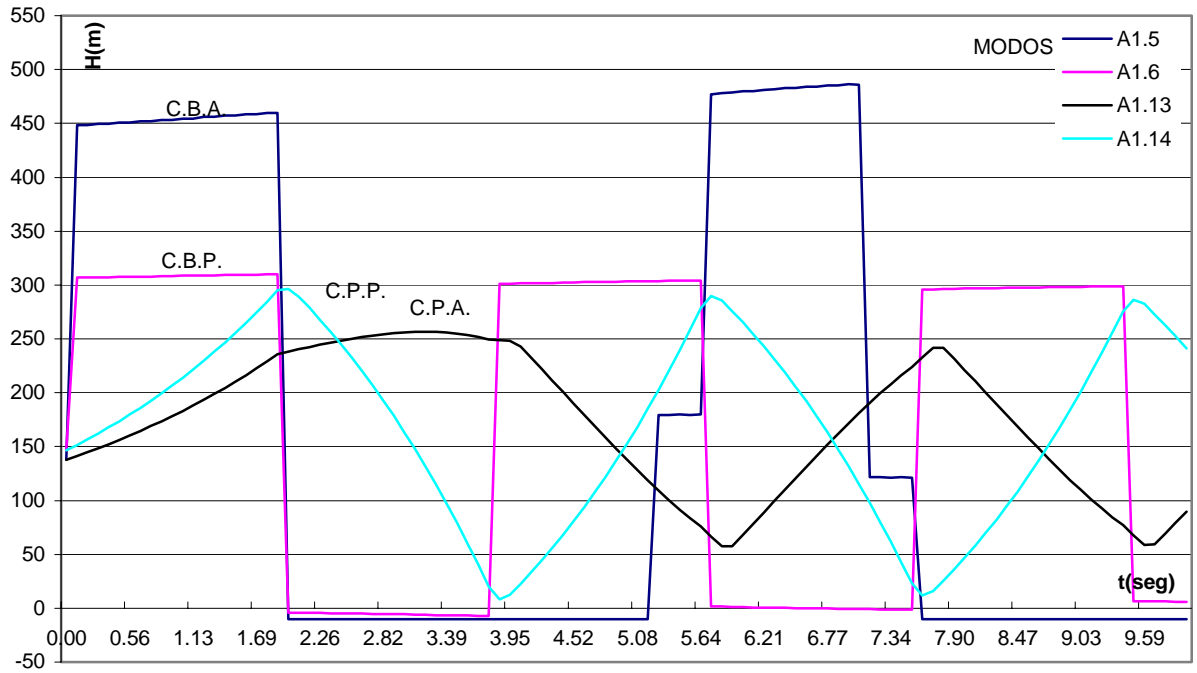
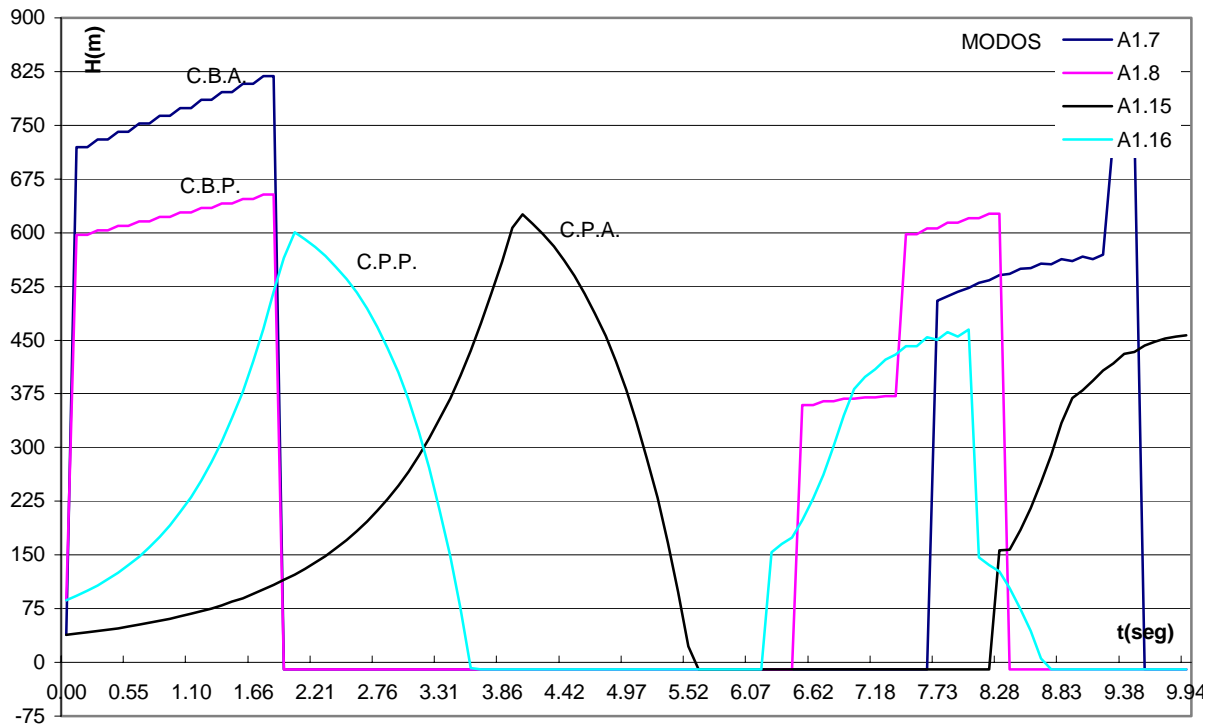


Gráfico No. IV.3.2: Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a.
(L1 = 600 m , D1 = 0.25 m)



**Gráfico No. IV.3.3: Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a.
(L1 = 1200 m , D1 = 0.5 m)**



**Gráfico No. IV.3.4: Esquema A.1: Variación de presión en la válvula a.
(L1 = 1200 m , D1 = 0.25 m)**

IV.3.3 Análisis de resultados caso A.1

En las gráficas No. IV.3.1, IV.3.2, IV.3.3 y IV.3.4 se observan las sobrepresiones generadas por los distintos modos de operación; en ellas se aprecia la influencia del tiempo de cierre de la válvula, la apertura inicial de la misma y la influencia de los parámetros geométricos.

Las velocidades de ondas calculadas fueron las siguientes: 1275.7 m/s^2 para $D = 0.5 \text{ m}$ y 1304.5 m/s^2 para $D = 0.25 \text{ m}$.

Las sobrepresiones creadas en sistemas de igual diámetro pero de diferente longitud (gráficas No. IV.3.1 vs. IV.3.3 o IV.3.2 vs. IV.3.4) están en el mismo orden de magnitud para los casos de cierre brusco, con la diferencia de una mayor duración para el sistema de tubería más larga debido al período de oscilación mayor. Con respecto a la diferencia entre cierre progresivo cierre brusco; en los gráficos No. IV.3.1 y IV.3.2 se nota una atenuación del 60% y en los gráficos No. IV.3.3 y IV.3.4 la atenuación es del 35% aproximadamente con respecto a las sobrepresiones generadas por el cierre brusco, esta diferencia se debe a la longitud del sistema que influye en el período de oscilación de la onda ya que para una distancia mayor el comportamiento del cierre gradual se asemeja al cierre brusco, debido a que la onda de presión tarda más en regresar a la válvula. Cabe destacar que en las gráficas No. IV.3.1 y No. IV.3.3 para los modos de operación de cierre gradual no ocurre separación de columna líquida. Por otro lado se tiene que para sistemas de igual longitud y diferentes diámetros (gráficas No. IV.3.1 vs. IV.3.2 o IV.3.3 vs. IV.3.4) las sobrepresiones generadas para un diámetro igual a la mitad del diámetro original, doblaron en magnitud a las sobrepresiones originales. Este comportamiento coincide con la ecuación básica del Golpe de Ariete (ver ec. I.5.16, Joukowsky) donde la velocidad de la onda es directamente proporcional a la sobrepresión generada.

En los cuatros gráficos se evidencia claramente la influencia de la apertura inicial en los modos de cierre brusco, observándose una disminución evidente de la sobrepresión para los modos de cierre de válvula brusco con válvula al inicio parcialmente abierta ($\tau_i = 0.5$). Por el contrario en los modos de cierre gradual no se observa una disminución de las sobrepresiones generadas, obteniéndose para la mayoría de los sistemas presiones ligeramente mayores; este comportamiento se atribuye al tiempo de cierre utilizado siendo la mitad del tiempo de cierre total.

De manera general se observa en todas las gráficas un comportamiento cíclico de la variación de presión, además en las gráficas No. IV.3.1 y IV.3.3 las mayores sobrepresiones no fueron obtenidas en el primer intervalo de tiempo sino debido a la sobrepresión generada al colapsarse la cavidad de vapor.

En la tabla No. IV.3.2 se puede comparar las presiones máximas calculadas con el Método de las Características y las presiones calculadas por la ecuación de Joukowsky, notando la similitud para los modos de cierre brusco aunque en algunos debido a la separación de la columna líquida la sobrepresión generada es un poco mayor.

Para evaluar la magnitud de las sobrepresiones, se toma como la presión admisible la presión de trabajo que aparece en la Norma B16.5 (ver apéndice B) para un sistema de rating 300# , $P_{adm} = 740$ psig lo que equivale a un altura $H_{adm} = 521.24$ m. De acuerdo a esto los siguientes modos de operación fallarían: A1.3 90% por encima, A1.4 59% por encima, A1.7 57% por encima, A1.8 25% por encima, A1.15 20% por encima, A1.16 15% por encima.

Para estudiar los casos A.2 y A.3 se selecciona arbitrariamente el modo A1.5 y de esta manera estudiar el efecto de la válvula de alivio y del by-pass en el sistema.

Tabla No. IV.3.2: Caso A.1 Alturas máximas obtenidas en la válvula a.

Modos	Hmáx (m)	Hjou (m)
A.1.1	478.16	459.78
A.1.2	310.78	309.10
A.1.3	994.12	905.93
A.1.4	829.57	676.56
A.1.5	486.35	447.16
A.1.6	309.92	306.56
A.1.7	818.54	707.91
A.1.8	653.04	590.34
A.1.9	193.36	459.78
A.1.10	208.62	309.10
A.1.11	488.22	905.93
A.1.12	495.37	676.56
A.1.13	256.47	447.16
A.1.14	296.21	306.56
A.1.15	625.23	707.91
A.1.16	600.53	590.34

IV.4 CASO A.2: SISTEMA HIDRAULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO

IV.4.1 Parámetros y características operacionales del caso A.2.

Al esquema A.1 se le incorporo una válvula de alivio de acuerdo al esquema A.2. Se selecciono una presión de apertura o seteo $H_{set} = 408.64$ m para la válvula de alivio y estudiamos tres modos de operación que corresponderían a tres diámetros de orificio de la válvula de alivio (10% Q_0 , 40% Q_0 y 100% Q_0).

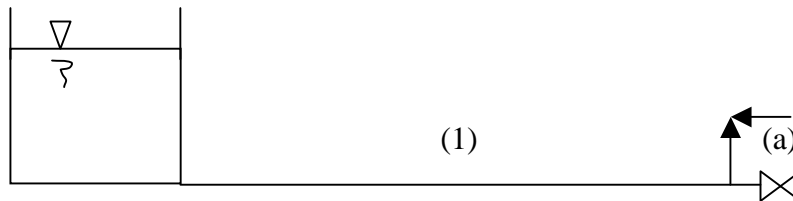


Figura No. IV.4.1: Esquema A.2: Sistema tanque, tubería y válvula.

$$L_1 = 1200 \text{ m} \quad D_1 = 0.5 \text{ m}$$

Tabla No. IV.4.1: Caso A.2 Modos de operación, parámetros de la válvula de alivio y condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Válvula a	Q_{ades} (m^3/s)	H_{set} (m)	Q_{01} (m^3/s)
A2.1	C.B.A.	0.04674	408.64	0.4674
A2.2	C.B.A.	0.18696	408.64	0.4674
A2.3	C.B.A.	0.46740	408.64	0.4674

IV.4.2 Resultados obtenidos en el caso A.2.

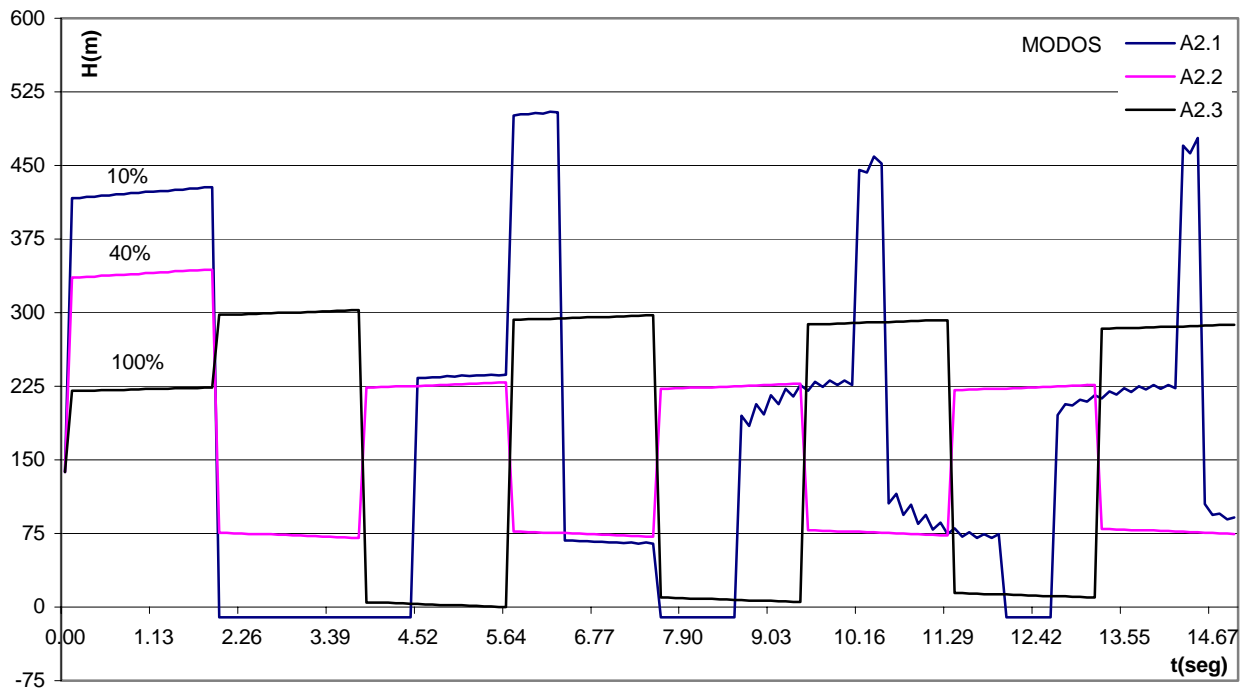


Gráfico No. IV.4.1: Esquema A.2: Variación de presión en la válvula a.

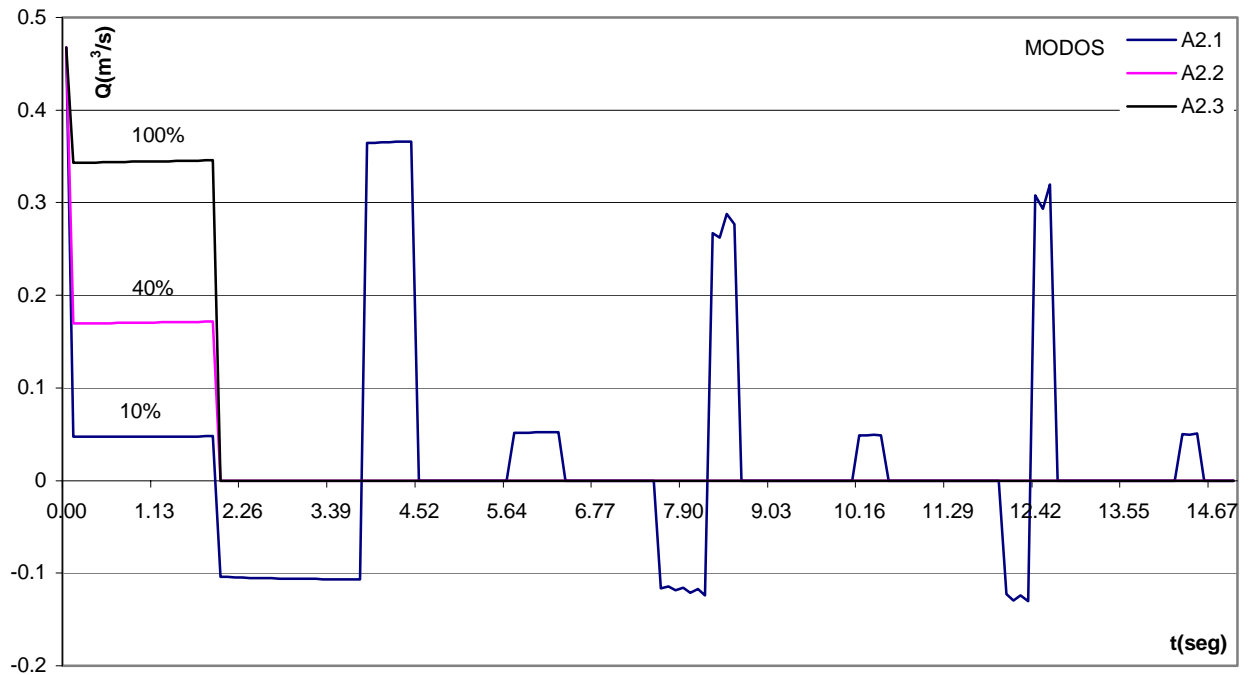


Gráfico No. IV.4.2: Esquema A.2: Variación de caudal en la válvula a.

IV.4.3 Análisis de resultados caso A.2

En la gráfica No. IV.4.1 destaca la disminución de la sobrepresión para un mayor caudal de desalojo. En el modo A2.1 (10%Q0) vemos en la gráfica No. IV.4.2 que a pesar que la válvula se abre, no es suficiente para liberar la sobrepresión y la presión sigue subiendo pasando la presión de seteo de la válvula de alivio y alcanzando presiones mayores incluso que en el modo A1.5, ocasionado por la apertura y cierre constante de la válvula de alivio. El modo A2.2 (40%Q0) es el que actúa en este caso de la manera más eficiente ya que es capaz de liberar la sobrepresión por debajo del nivel de seteo y logra atenuar las sobrepresiones en un 50% con respecto al modo A1.5. Por último se tiene el modo A.3 (100%Q0) que a pesar que libera la sobrepresión en el primer intervalo de tiempo mejor que el resto de los otros modos, el cierre brusco de la misma válvula de alivio y la cantidad de caudal asociado generan un salto en la sobrepresión afectando la atenuación del golpe de ariete, atenuando solamente en un 30% la sobrepresiones con respecto al modo A1.5.

IV.5 CASO A.3 : SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS

IV.5.1 Parámetros y características operacionales del caso A.3.

Para estudiar la influencia del by-pass se seleccionaron diferentes longitudes y diámetros, con la peculiaridad que en los primeros cuatro modos todas las longitudes son múltiplos de 5 y los otros cuatro modos las longitudes no tienen un mínimo común múltiplo. De esta manera se logra ver la influencia de la superposición de ondas de presión.

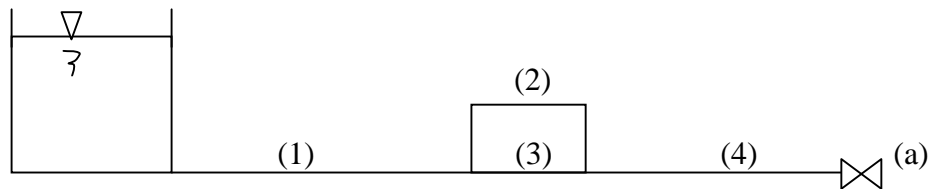


Figura No. IV.5.1: Esquema A.3 : Sistema tanque, tuberías, válvula y by-pass.

Tabla No. IV.5.1: Caso A.3 Modos de operación y parámetros geométricos.

Modos	Válvula a	L1 (m)	D1 (m)	L2 (m)	D2 (m)	L3 (m)	D3 (m)	L4 (m)	D4 (m)
A3.1	C.B.A.	1100	0.50	25	0.25	20	0.50	80	0.50
A3.2	C.B.A.	1100	0.50	25	0.50	20	0.50	80	0.50
A3.3	C.B.A.	1100	0.50	200	0.25	20	0.50	80	0.50
A3.4	C.B.A.	1100	0.50	200	0.50	20	0.50	80	0.50
A3.5	C.B.A.	1122	0.50	35	0.25	21	0.50	57	0.50
A3.6	C.B.A.	1122	0.50	35	0.50	21	0.50	57	0.50
A3.7	C.B.A.	1122	0.50	211	0.25	21	0.50	57	0.50
A3.8	C.B.A.	1122	0.50	211	0.50	21	0.50	57	0.50

Tabla No. IV.5.2: Caso A.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m³/s)	Q02 (m³/s)	Q03 (m³/s)	Q04 (m³/s)
A3.1	0.4674	0.0638	0.4036	0.4674
A3.2	0.4675	0.2207	0.2468	0.4675
A3.3	0.4674	0.0247	0.4427	0.4674
A3.4	0.4674	0.1123	0.3551	0.4674
A3.5	0.4674	0.0563	0.4111	0.4674
A3.6	0.4675	0.2041	0.2635	0.4675
A3.7	0.4674	0.0247	0.4427	0.4674
A3.8	0.4674	0.1121	0.3553	0.4674

IV.5.2 Resultados obtenidos en el caso A.3.

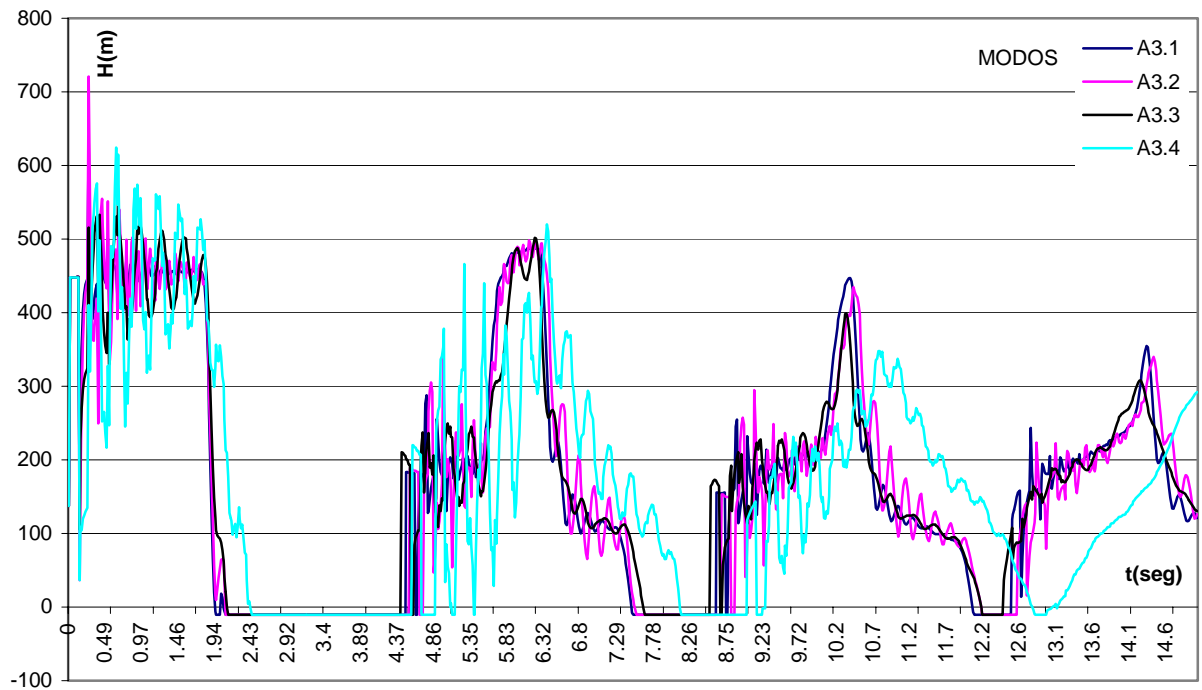


Gráfico IV.5.1: Esquema A.3: Variación de presión en la válvula a.

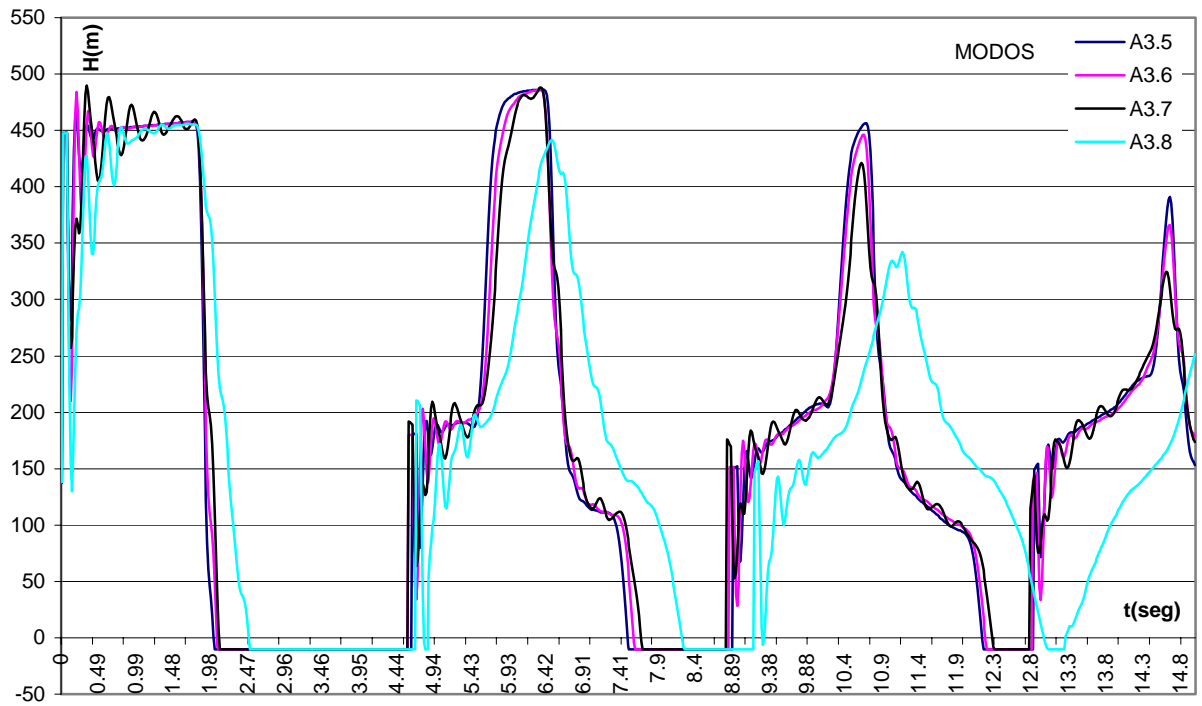


Gráfico IV.5.2: Esquema A.3: Variación de presión en la válvula a.

IV.5.3 Análisis de resultados caso A.3

Primero en términos generales se observa en las gráficas No. IV.5.1 y IV.5.2 un comportamiento cíclico de las sobrepresiones y una leve pendiente de atenuación. También se puede observar en el modo A3.2 que tenemos sobrepresiones mayores que en el modo A1.5, pero también logramos obtener sobrepresiones menores como en el modo A3.8.

En el gráfico No. IV.5.1 se ve una mayor variación de las sobrepresiones ocasionado por la suma de las ondas de presión, por el contrario en el gráfico No. IV.5.2 se observa un comportamiento más limpio debido a que las sobrepresiones son un promedio de las sumas y/o restas de las ondas de presión.

Otro resultado que es importante mencionar, resulta al tener el diámetro del by-pass igual al diámetro del sistema, lo que quiere decir velocidad de ondas iguales, las sobrepresiones alcanzadas en general fueron mayores que con un diámetro menor, esto ocasionado a la mayor probabilidad de solapamiento de ondas de presión.

Por último se tiene que al comparar los resultados para un mismo diámetro pero diferentes longitudes, se obtiene en este caso que la atenuación aumenta para una longitud de by-pass mayor.

IV.6 CASO B.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN

IV.6.1 Parámetros y características operacionales del caso B.1.

El caso B.1 consiste en un sistema hidráulico basado en el modo A1.5, comprendido por un tanque unido a una tubería principal y esta a su vez con dos ramales “largos” con válvulas en sus extremos. Cada válvula posee una ley de cierre diferente y además se estudia la influencia cuando una válvula esta todo el tiempo totalmente abierta o todo el tiempo totalmente cerrada.

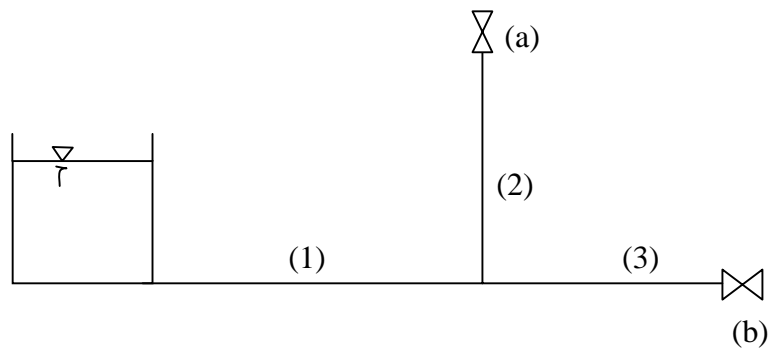


Figura No. IV.6.1: Esquema B.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 600 m.
D1 = 0.5 m.

L2 = 600 m.
D2 = 0.5 m.

L3 = 1200 m.
D3 = 0.5 m.

Tabla No. IV.6.1: Caso B.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).

Modos	Válvula a	tc (seg)	τ_i	Válvula b	tc (seg)	τ_i
B.1.1	C.B.A	0.0	1.0	C.B.A	0.0	1.0
B.1.2	C.P.A	2.0	1.0	C.P.A	4.0	1.0
B.1.3	C.B.P	0.0	0.5	C.B.P	0.0	0.5
B.1.4	C.P.P	1.0	0.5	C.P.P	2.0	0.5
B.1.5	C.B.A	0.0	1.0	T.C	T.C	0.0
B.1.6	C.P.A	2.0	1.0	T.C	T.C	0.0
B.1.7	C.B.P	0.0	0.5	T.C	T.C	0.0
B.1.8	C.P.P	1.0	0.5	T.C	T.C	0.0

B.1.9	C.B.A	0.0	1.0	T.A	T.A	1.0
B.1.10	C.P.A	2.0	1.0	T.A	T.A	1.0
B.1.11	C.B.P	0.0	0.5	T.A	T.A	1.0
B.1.12	C.P.P	1.0	0.5	T.A	T.A	1.0
B.1.13	T.C	T.C	0.0	C.B.A	0.0	1.0
B.1.14	T.C	T.C	0.0	C.P.A	4.0	1.0
B.1.15	T.C	T.C	0.0	C.B.P	0.0	0.5
B.1.16	T.C	T.C	0.0	C.P.P	2.0	0.5
B.1.17	T.A	T.A	1.0	C.B.A	0.0	1.0
B.1.18	T.A	T.A	1.0	C.P.A	4.0	1.0
B.1.19	T.A	T.A	1.0	C.B.P	0.0	0.5
B.1.20	T.A	T.A	1.0	C.P.P	2.0	0.5

Tabla No. IV.6.2: Caso B.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m³/s)	Q02 (m³/s)	H0(a) (m)	Q03 (m³/s)	H0(b) (m)
B1.1	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.2	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.3	0.4736	0.2375	141.98	0.2361	140.41
B1.4	0.4736	0.2375	141.98	0.2361	140.41
B1.5	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00
B1.6	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00
B1.7	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00
B1.8	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00
B1.9	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.10	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.11	0.6783	0.2318	135.33	0.4465	125.47
B1.12	0.6783	0.2318	135.33	0.4465	125.47
B1.13	0.4580	0.0000	0.00	0.4580	132.03
B1.14	0.4580	0.0000	0.00	0.4580	132.03
B1.15	0.2400	0.0000	0.00	0.2400	145.06
B1.16	0.2400	0.0000	0.00	0.2400	145.06
B1.17	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.18	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54
B1.19	0.6858	0.4556	130.64	0.2303	133.54
B1.20	0.6858	0.4556	130.64	0.2303	133.54

Leyes de cierre de las válvulas:

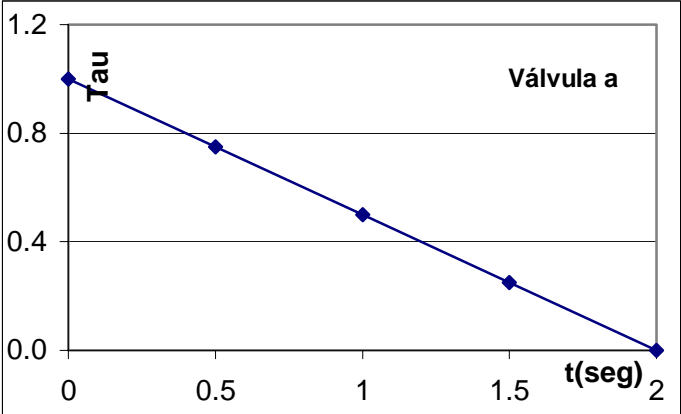


Figura No. IV.6.2: Ley de cierre de la válvula a.

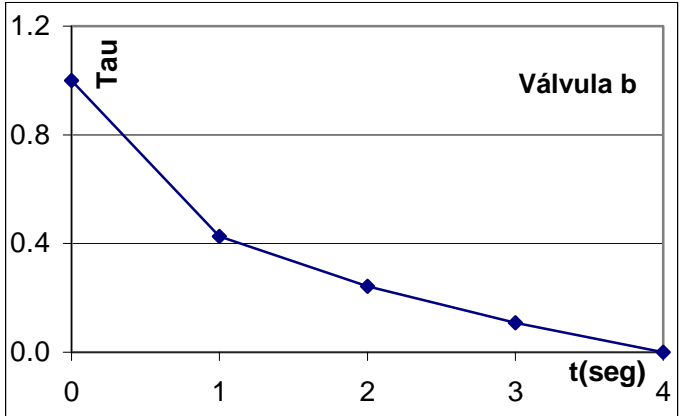
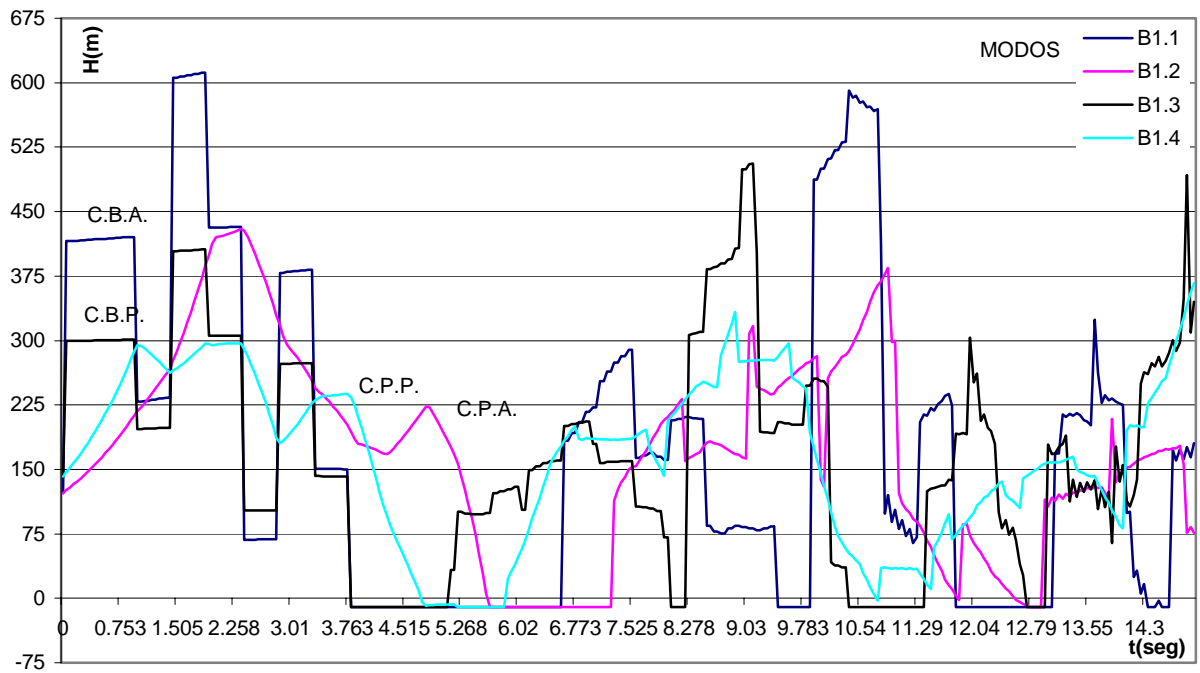
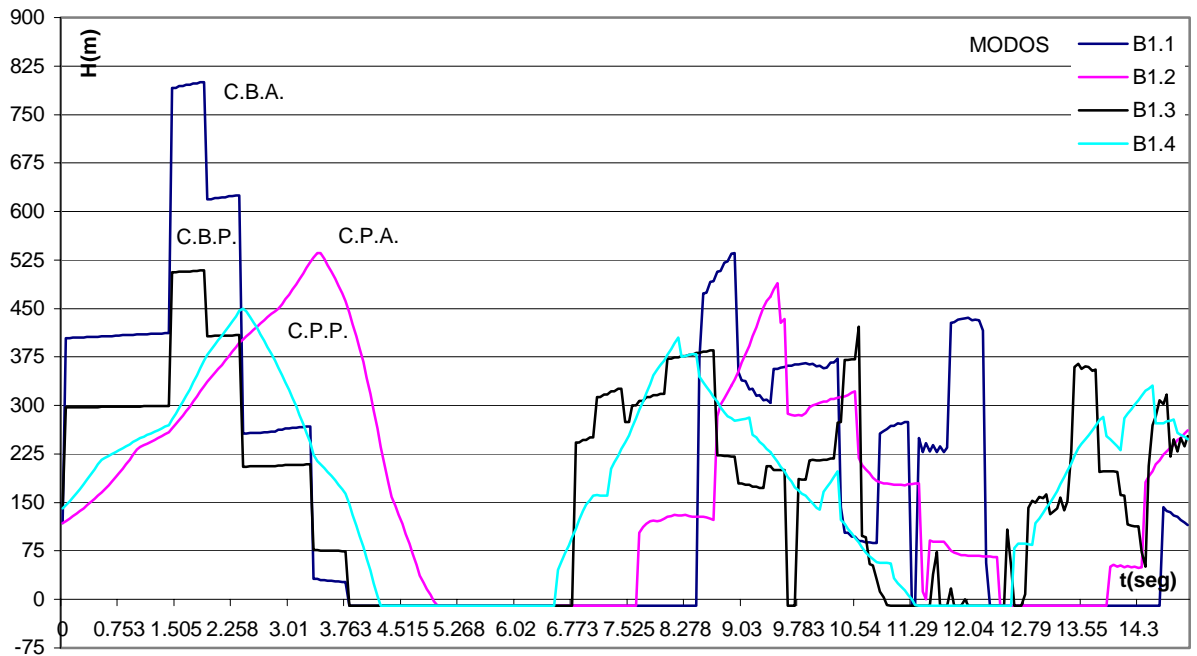


Figura No. IV.6.3: Ley de cierre de la válvula b.

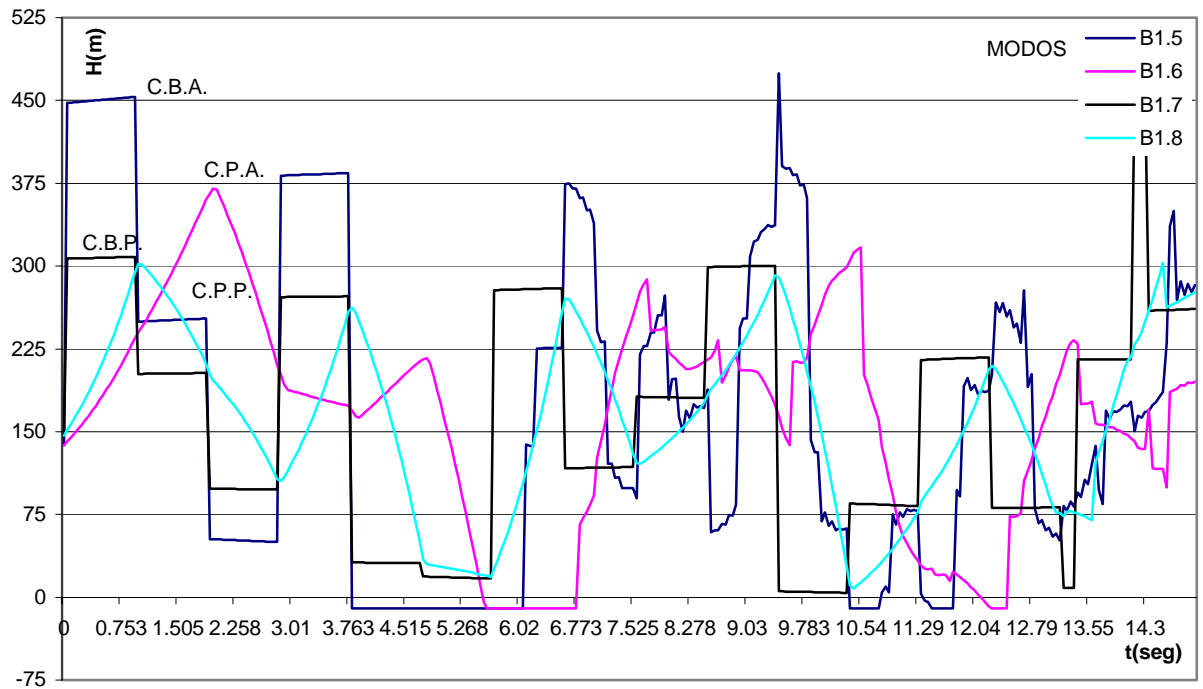
IV.6.2 Resultados obtenidos en el caso B.1.



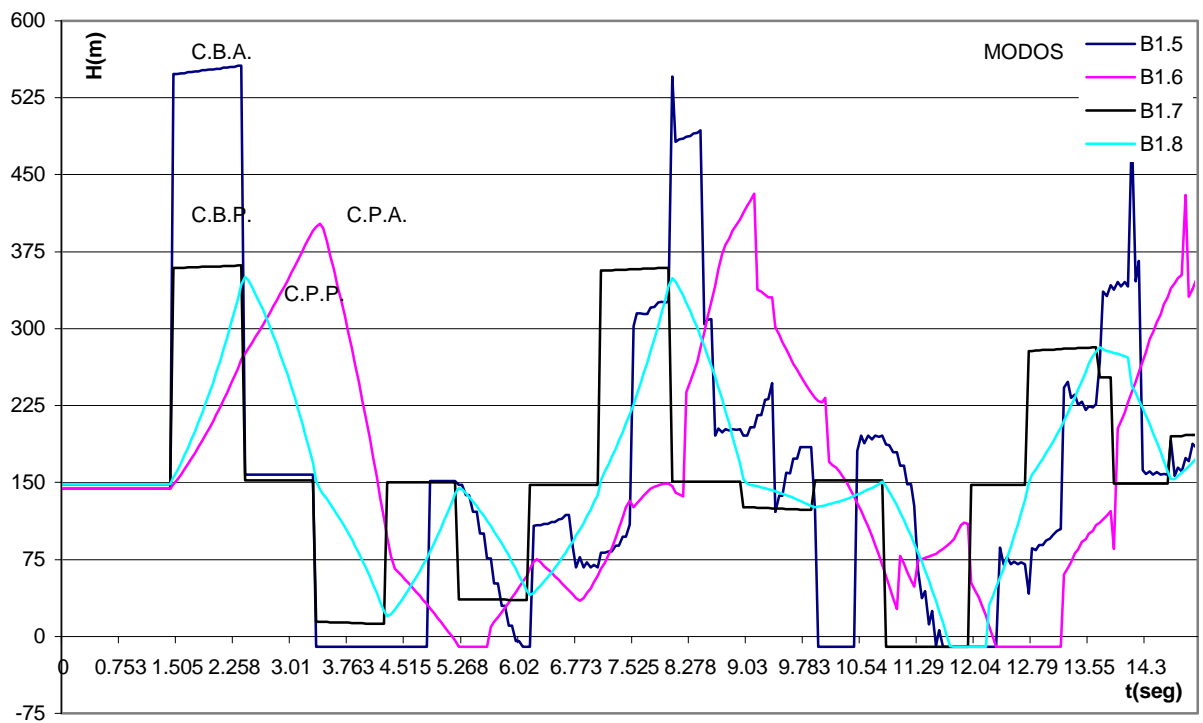
**Gráfico No. IV.6.1: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.
(Todas las válvulas operando)**



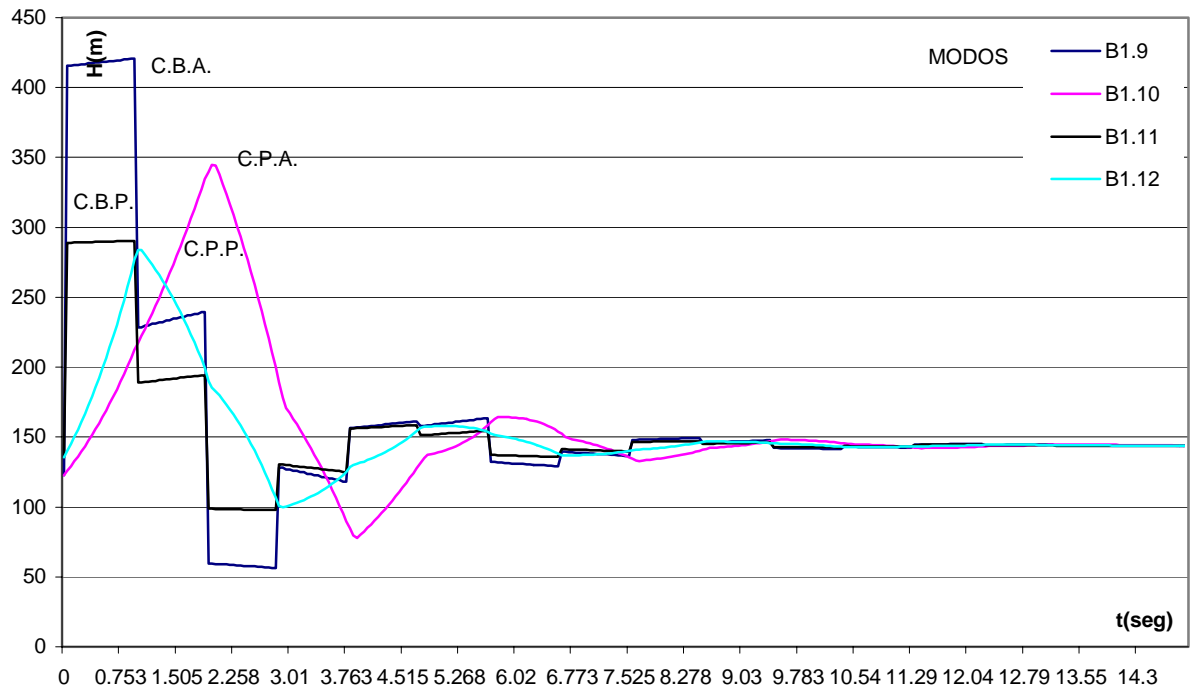
**Gráfico No. IV.6.2: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.
(Todas las válvulas operando)**



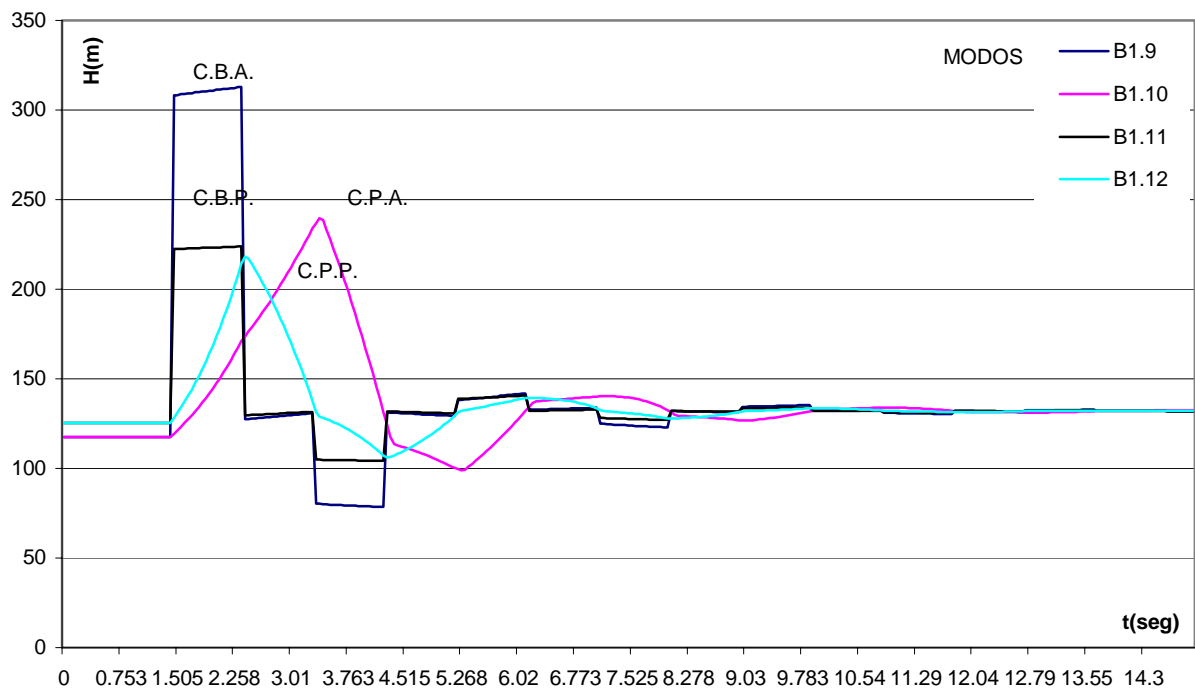
**Gráfico No. IV.6.3: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula b totalmente cerrada)**



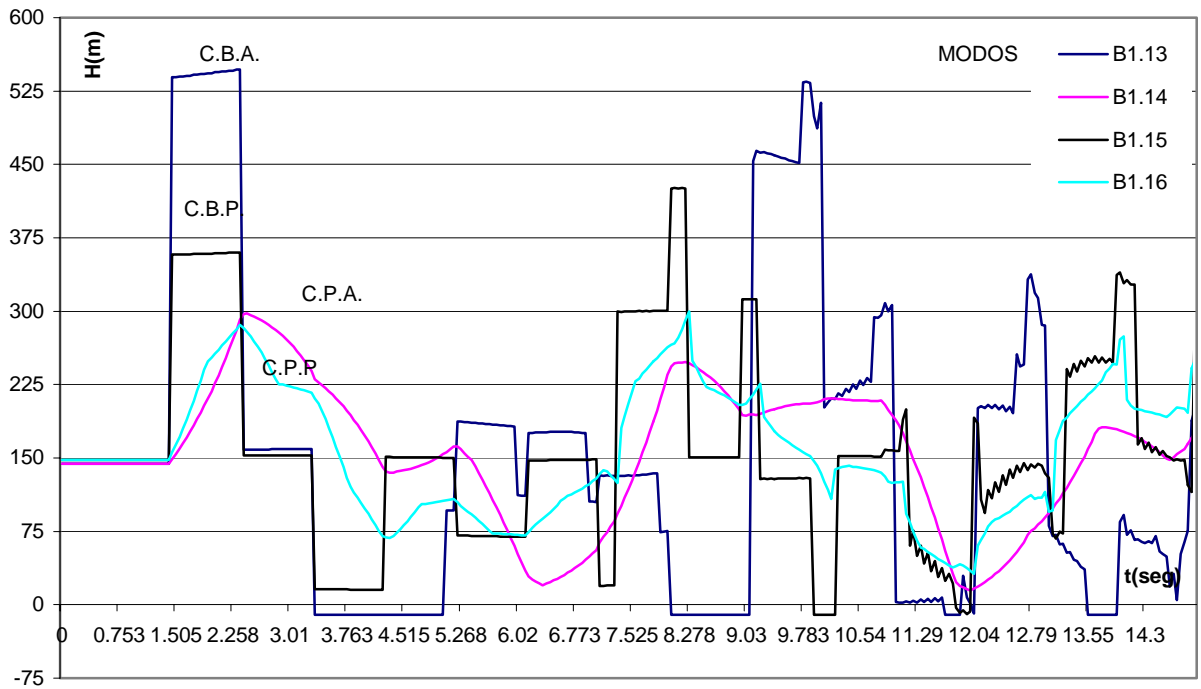
**Gráfico No. IV.6.4: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula b totalmente cerrada)**



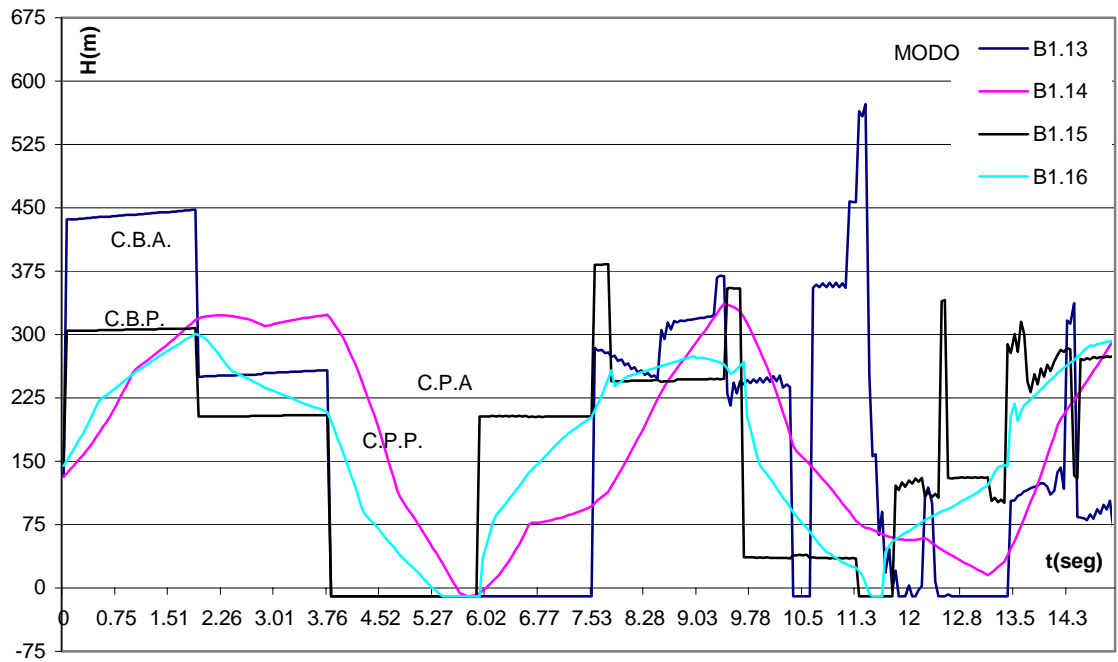
**Gráfico No. IV.6.5: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula b totalmente abierta)**



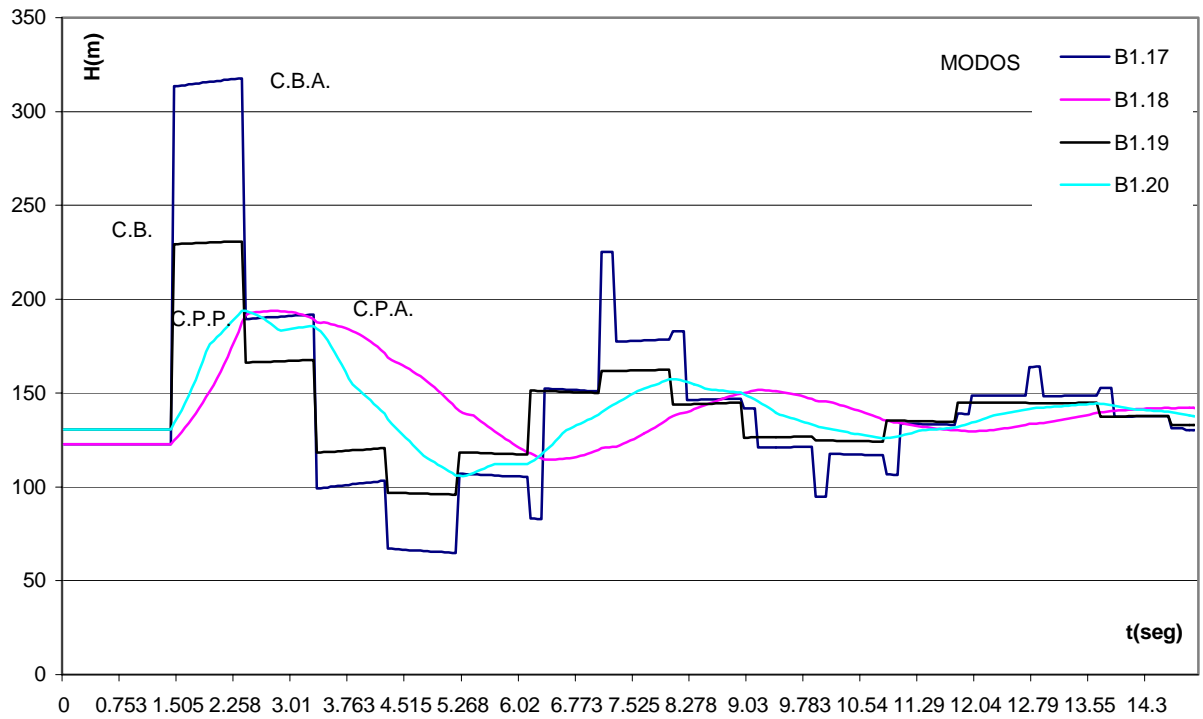
**Gráfico No. IV.6.6: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula b totalmente abierta)**



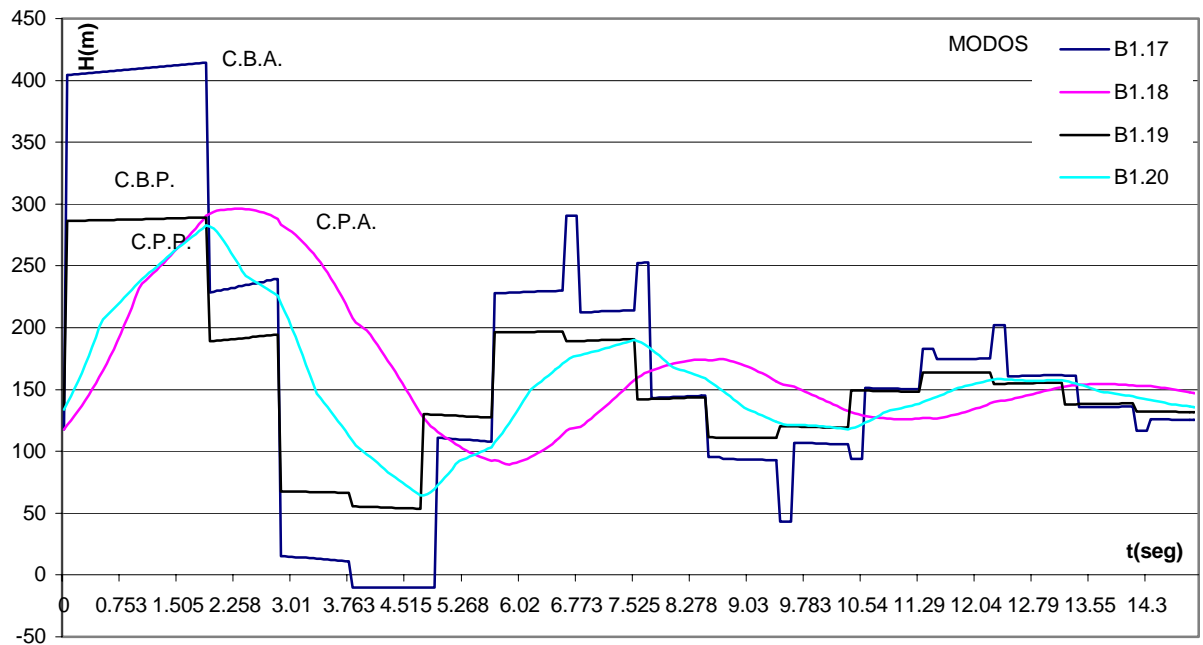
**Gráfico No. IV.6.7: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula a totalmente cerrada)**



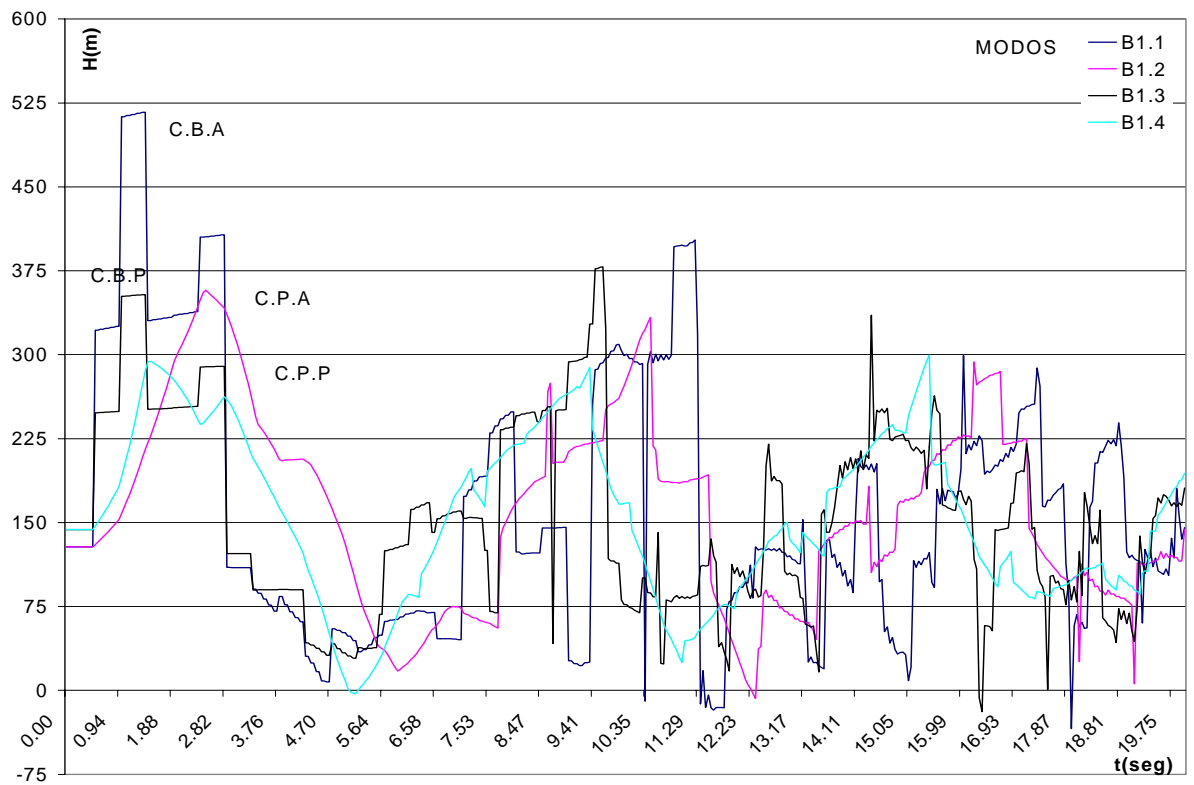
**Gráfico No. IV.6.8: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula a totalmente cerrada)**



**Gráfico No. IV.6.9: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula a totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.6.10: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula a totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.6.11: Esquema B.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación.
(Todas las válvulas operando)**

IV.6.3 Análisis de resultados caso B.1

En las gráficas No. IV.6.1 y IV.6.2 se observa la variación de presión en las válvulas *a* y *b* respectivamente, para cuando las válvulas operan al mismo tiempo. Tanto en la gráfica No. IV.6.1 como en la gráfica No. IV.6.2 en los primeros intervalos de tiempo, se logra ver un comportamiento igual a que si el sistema estuviese compuesto por una sola tubería, en efecto si se compara los modos B1.1 y B1.3 con los modos A1.5 y A1.6 se observa la similitud en la primera onda de presión. Por supuesto luego de este primer intervalo de tiempo comienza a variar de una forma desordenada la presión en las válvulas *a* y *b* debido a la suma y/o resta de ondas de presión producidas en cada tubería.

De igual forma se evidencia en las gráficas No. IV.6.1 y IV.6.2 la influencia de los distintos modos de operación, lográndose atenuaciones para los modos de cierre de válvula gradual y más aun en los modos con válvula al inicio parcialmente abiertas ($\tau_i = 0.5$).

Analizando las gráficas No. IV.6.3 y IV.6.4 (Válvula *b* totalmente cerrada), se observa una reducción en las sobrepresiones producidas en la válvula *a* con respecto a la gráfica a la gráfica No. IV.6.1, poniendo de manifiesto la influencia del otro ramal. En la gráfica No. IV.6.4 se observa con claridad el intervalo de tiempo que tarda en llegar las sobrepresiones a la válvula *b*. A pesar de la inactividad del ramal de la válvula *b* se sigue observando un gran número de picos de presión, producidas por la reflexión y transmisión de las ondas de presión dentro del sistema.

En las gráficas No. IV.6.7 y IV.6.8 (válvula *a* totalmente cerrada), se observa un comportamiento parecido al anterior. En este caso las sobrepresiones en la válvula *b* (gráfico No. IV.6.8) están en el mismo orden de magnitud pero durante un intervalo de tiempo mayor, que las producidas en la válvula *a* (gráfica No. IV.6.3) para los modos de

cierre brusco, demostrando en este caso la poca influencia de la longitud en la magnitud de la sobrepresión.

Para los modos de cierre gradual al comparar las gráficas No. IV.6.3 y IV.6.4 con las gráficas No. IV.6.7 y IV.6.8 destaca la diferencia en la magnitud de las sobrepresiones, ya que para la válvula *a* el cierre es lineal ($t_c = 2$ seg) y para la válvula *b* el cierre es de forma x^n ($t_c = 4$ seg) logrando una mejor atenuación de las sobrepresiones.

Por último analizando las gráficas No. IV.6.5, IV.6.6, IV.6.9 y IV.6.10 (válvula *a* y *b* totalmente abierta respectivamente), se observa una atenuación muy rápida de las sobrepresiones generadas en las dos válvulas. Esto se debe a la transformación de energía de presión en energía cinética que ocurre en la válvula abiertas. La atenuación en las gráficas No. IV.6.5 y IV.6.6 se realiza de una manera más rápida debido a que el período de oscilación de las ondas de presión es más corto que el período de oscilación de las ondas de presión en las gráficas No. IV.6.9 y IV.6.10. Es importante resaltar que los sistemas tienden a estabilizarse a su estado estacionario en las cuatro gráficas.

En la gráfica No. IV.6.11 se observa la variación de presión en el nodo de bifurcación obteniéndose el mismo comportamiento que en las válvula pero con una magnitud ligeramente menor.

A pesar que la ecuación de Joukowsky solo esta definida para un sistema hidráulico con una sola tubería en la tabla No. IV.6.3 comparamos las presiones máximas calculadas con el Método de las Características y las presiones calculadas por la ecuación de Joukowsky, observando para el modo B1.1 (cierre brusco ambas válvulas) presiones muchos mayores a las calculadas por Joukowsky en ambas válvulas. Por otro lado se observa en los modos B1.5 y B1.13 (cierre brusco, un ramal inactivo) presiones mayores a la de Joukowsky, reflejando la importancia del ramal inactivo en las sobrepresiones del sistema.

De acuerdo a la $H_{adm} = 521.24$ m, los siguientes modos de operación fallarían: B1.1, B1.2, B1.5 y B1.13.

Para estudiar los casos B.2 y B.3 se selecciona el modo B1.1 siendo el más crítico al tener las mayores sobrepresiones.

Tabla No. IV.6.3: Caso B.1 Alturas máximas obtenidas en la válvulas.

Modos	H_{am}(m)	H_{ajou}(m)	H_{bm}(m)	H_{bjou}(m)
B1.1	611.72	414.99	800.49	403.74
B1.2	429.68	414.99	536.10	403.74
B1.3	506.02	299.26	508.69	296.81
B1.4	366.89	299.26	449.92	296.81
B1.5	474.42	447.09	556.20	0.00
B1.6	370.26	447.09	431.50	0.00
B1.7	463.33	306.52	361.46	0.00
B1.8	303.16	306.52	350.43	0.00
B1.9	420.62	414.99	312.73	403.74
B1.10	344.87	414.99	239.55	403.74
B1.11	290.42	288.87	223.80	421.17
B1.12	284.03	288.87	218.29	421.17
B1.13	546.84	0.00	572.37	435.35
B1.14	297.67	0.00	336.47	435.35
B1.15	426.31	0.00	383.34	304.04
B1.16	299.50	0.00	300.67	304.04
B1.17	317.79	414.99	414.45	403.74
B1.18	193.84	414.99	296.12	403.74
B1.19	230.87	432.36	289.09	286.06
B1.20	193.88	432.36	282.62	286.06

IV.7 CASO B.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO

IV.7.1 Parámetros y características operacionales del caso B.2.

En cada uno de los extremos de los ramales se colocó una válvula de alivio de acuerdo al esquema B.2. La presión de seteo será $H_{set} = 521.24$ m (de acuerdo a la norma B16.5) y se estudiarán 3 modos de operación (10% Q_0 , 40% Q_0 y 100% Q_0).

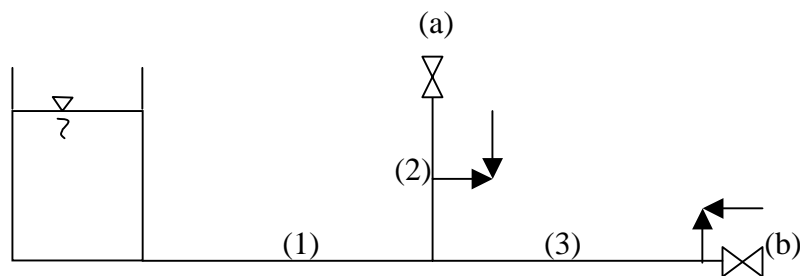


Figura No. IV.7.1: Esquema B.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

$L_1 = 600$ m.
 $D_1 = 0.5$ m.

$L_2 = 600$ m.
 $D_2 = 0.5$ m.

$L_3 = 1200$ m.
 $D_3 = 0.5$ m.

Tabla No. IV.7.1: Caso B.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.

Modos	Válvula a	Válvula b	Q_{ades} (m^3/s)	H_{set} (m)	Q_{bdes} (m^3/s)	H_{bset} (m)
B2.1	C.B.A.	C.B.A.	0.04414	521.24	0.04321	521.24
B2.2	C.B.A.	C.B.A.	0.17656	521.24	0.17284	521.24
B2.3	C.B.A.	C.B.A.	0.44140	521.24	0.43210	521.24

Tabla No. IV.7.2: Caso B.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q_{02} (m^3/s)	Q_{03} (m^3/s)
B2.1	0.4414	0.4321
B2.2	0.4414	0.4321
B2.3	0.4414	0.4321

IV.7.2 Resultados obtenidos en el caso B.2.

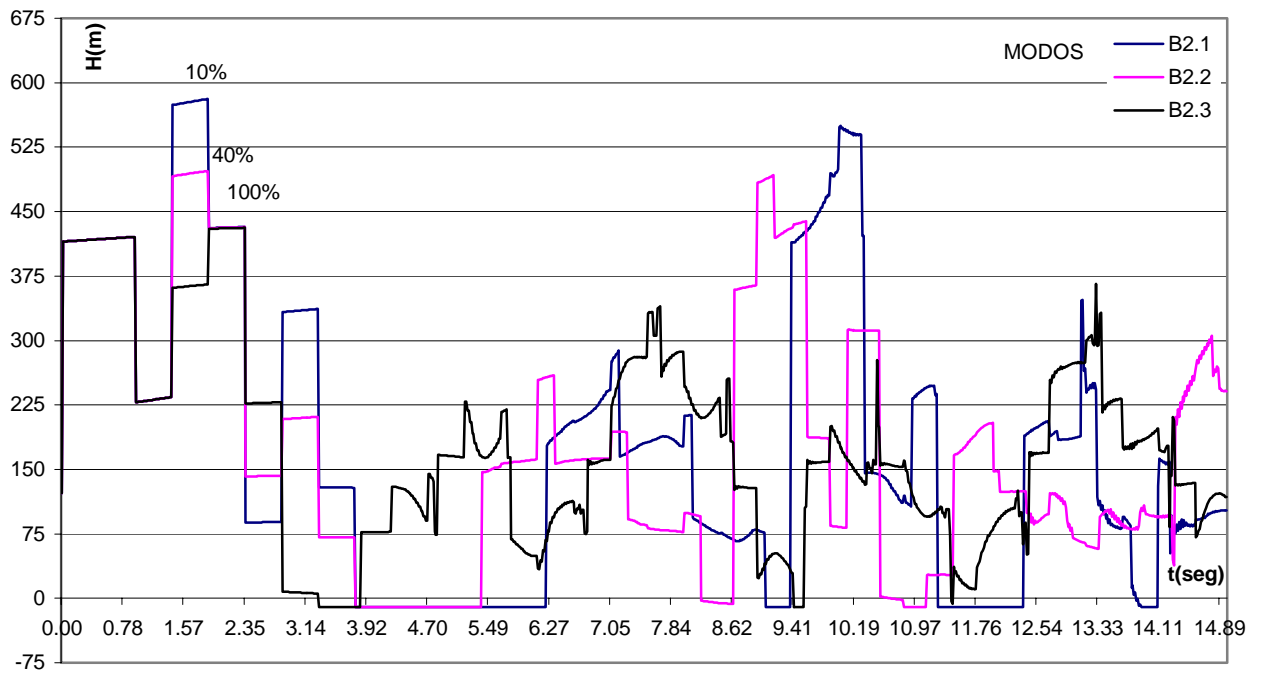


Gráfico No. IV.7.1: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula a.

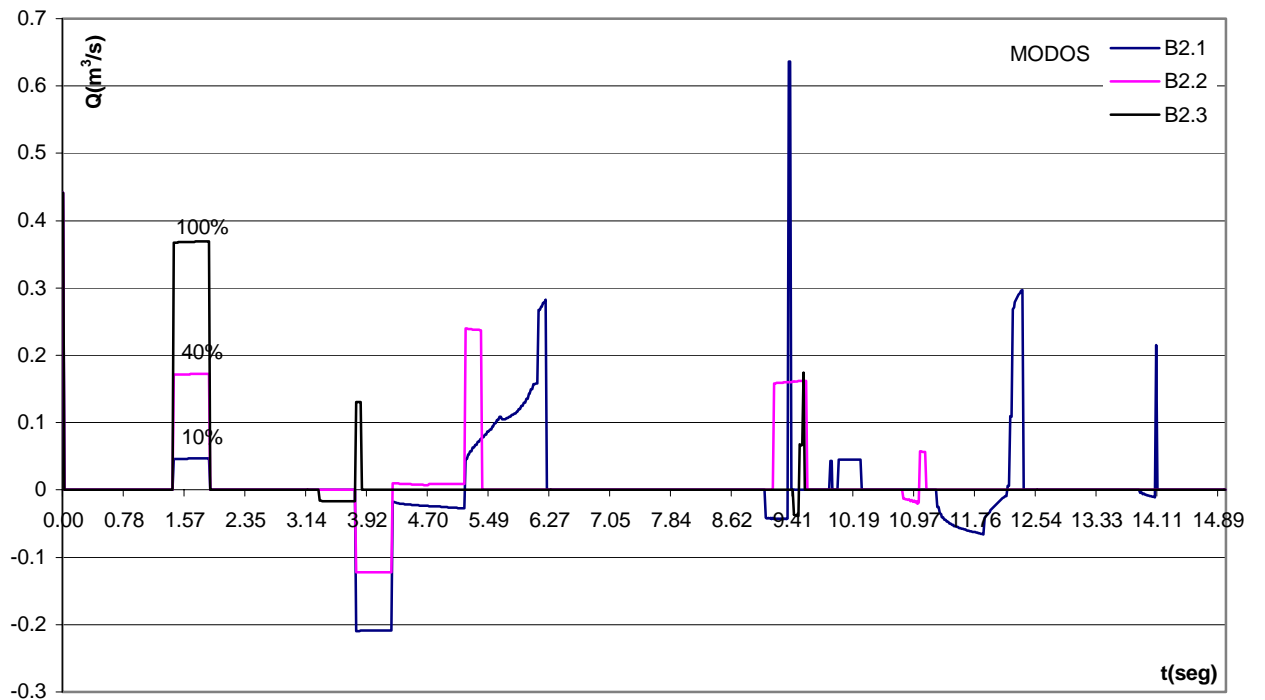


Gráfico No. IV.7.2: Esquema B.1: Variación de caudal en la válvula a.

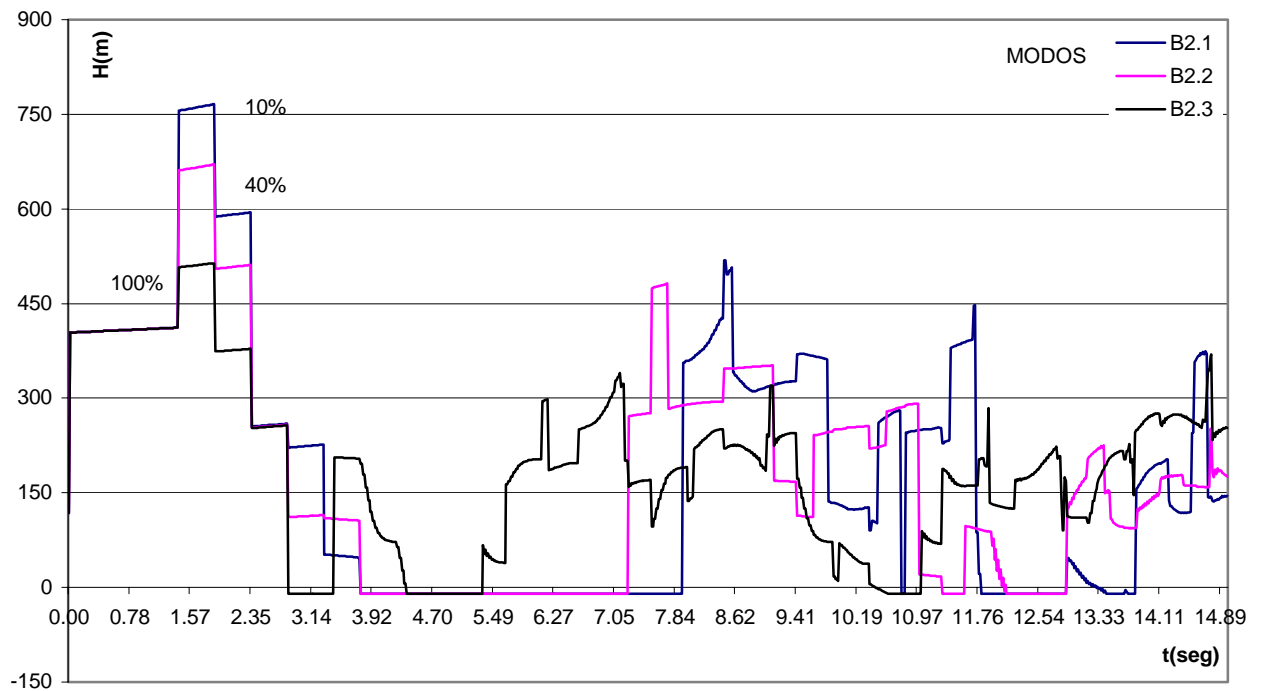


Gráfico No. IV.7.3: Esquema B.1: Variación de presión en la válvula b.

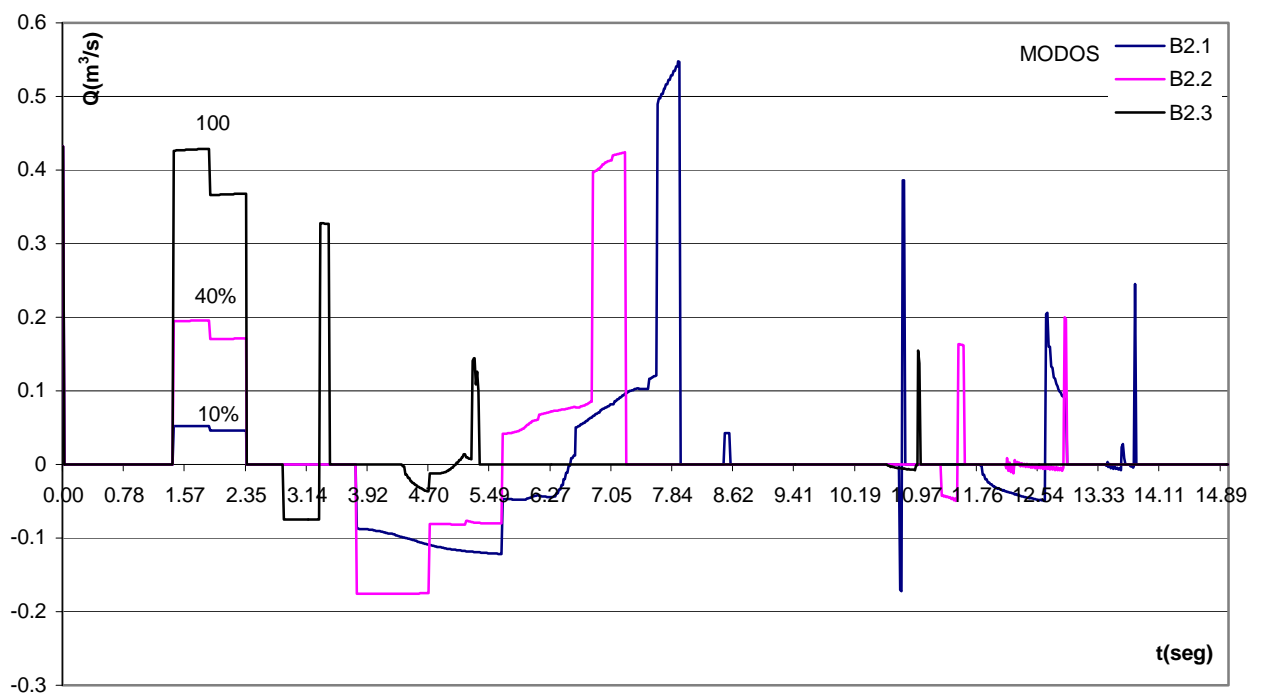


Gráfico No. IV.7.4: Esquema B.1: Variación de caudal en la válvula b.

IV.7.3 Análisis de resultados caso B.2

Estudiando el modo B2.1 se observa en ambas gráficas (IV.7.1 y IV.7.3) que el caudal de desalojo no es suficiente para liberar la presión por debajo de la presión admisible ya que la presión en la válvula *a* y en la válvula *b* sigue aumentando por encima de la presión de seteo de la válvula.

Con respecto al modo B2.2 resulta que para el extremo de la válvula *a* (grafico No. IV.7.1) el sistema se comporta por debajo de la presión máxima, no obstante en el extremo de la válvula *b* (gráfico No. IV.7.3), un caudal de desalojo del 40% de Q_0 no asegura liberar la presión de manera exitosa.

Por último con un valor de caudal de desalojo del 100% de Q_0 se asegura mantener las sobrepresiones por debajo de la presión admisible y además logramos una atenuación por el orden de 50% con respecto a las sobrepresiones generadas en el modo B1.1.

Cabe destacar que en los gráficos No. IV.7.2 y IV.7.4 se observan la presencia de caudales negativos seguidos de caudales positivos; estudiando los gráficos B2.1 y B2.3 notamos que estos caudales coinciden con la presencia de cavidades de vapor, siendo totalmente lógico el comportamiento debido a que cuando la cavidad de vapor aumenta se registran velocidades negativas en la cara de la columna líquida y al contrario cuando la cavidad de vapor disminuye.

IV.8 CASO B.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS

IV.8.1 Parámetros y características operacionales del caso B.3.

De acuerdo al esquema B.3 se colocó el by-pass antes del nodo de bifurcación de los dos ramales, se estudiara la influencia del by-pass con dos longitudes diferentes.

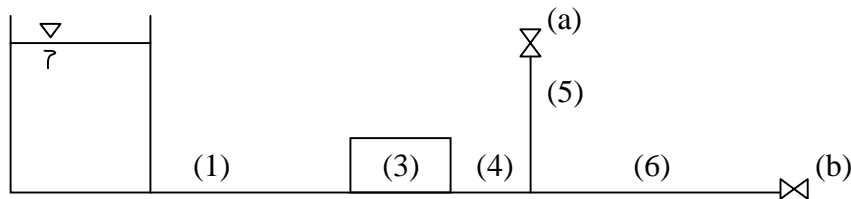


Figura No. IV.8.1: Esquema B.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 557 m L3 = 22 m L4 = 21 m L5 = 600 m L6 = 1200 m
 D1 = 0.5 m D3 = 0.5 m D4 = 0.5 m D5 = 0.5 m D6 = 0.5 m

Tabla No. IV.8.1: Caso B.3 Modos de operación, longitud del by-pass.

Modos	Válvula a	Válvula b	L2 (m)	D2 (m)
B3.1	C.B.A.	C.B.A.	113	0.5
B3.2	C.B.A.	C.B.A.	31	0.5

Tabla No. IV.8.2: Caso B.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	Q03 (m ³ /s)	Q04 (m ³ /s)	Q05 (m ³ /s)	Q06 (m ³ /s)
B3.1	0.8739	0.2675	0.6063	0.8739	0.4416	0.4323
B3.2	0.8745	0.3998	0.4746	0.8745	0.4419	0.4326

IV.8.2 Resultados obtenidos en el caso B.3.

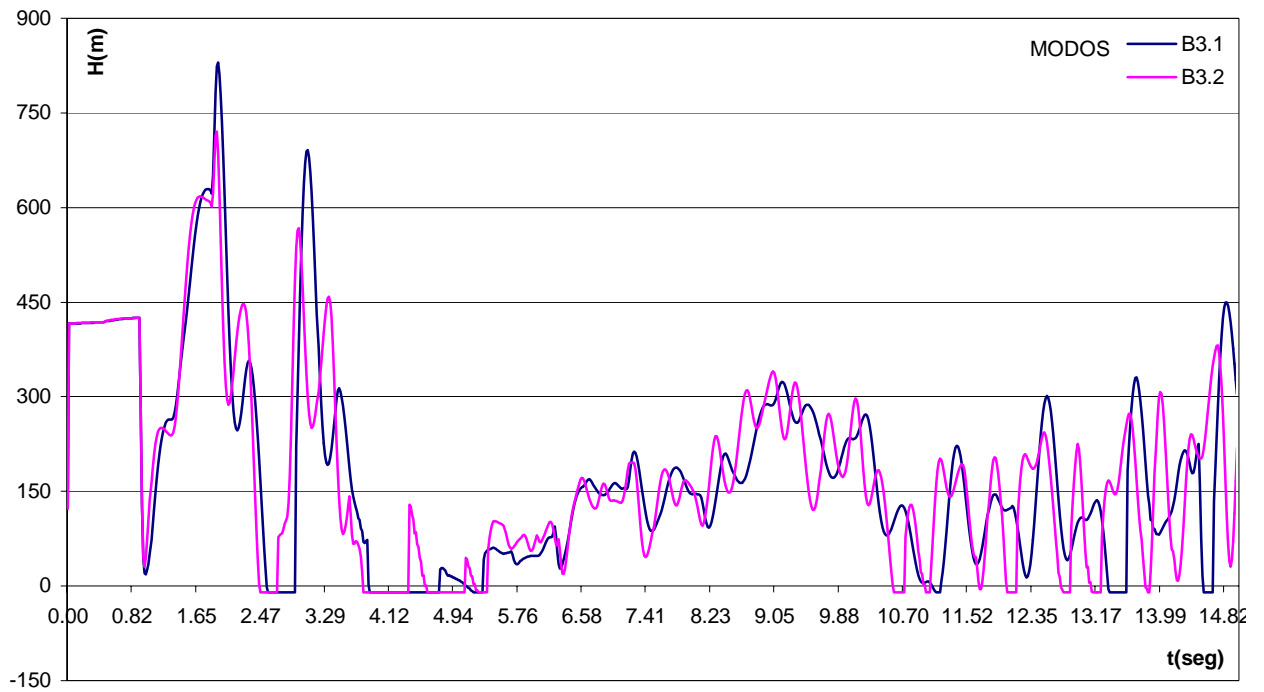


Gráfico No. IV.8.1: Esquema B.3: Variación de presión en la válvula a.

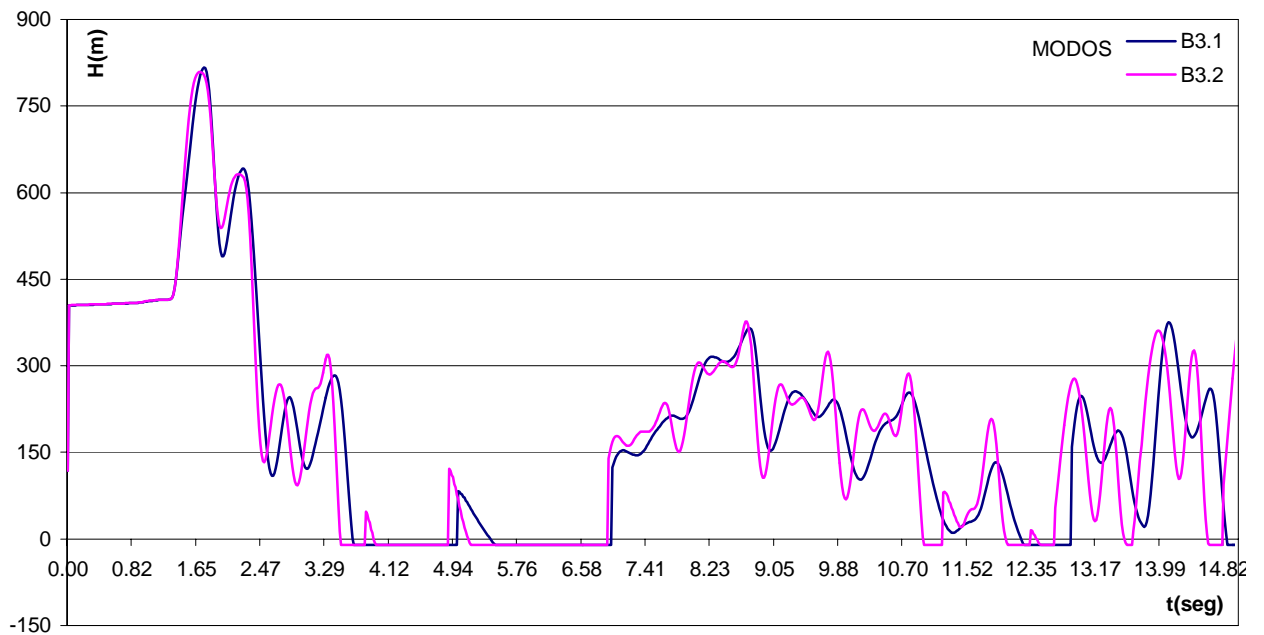


Gráfico No. IV.8.2: Esquema B.3: Variación de presión en la válvula b.

IV.8.3 Análisis de resultados caso B.3

Analizando las gráficas No. IV.8.1 y IV.8.2 se observa un comportamiento muy parecido entre ellas, al principio una serie de sobrepresiones altas, mayores a las sobrepresiones generadas en el modo B1.1; pero luego de este primer intervalo de tiempo obtenemos una atenuación de las sobrepresiones por el orden del 45% y 30% respectivamente. Existe una diferencia marcada entre el gráfico No. IV.8.1 y IV.8.2 la cual esta dada por el número de sobrepresiones que ocurre en el grafico No. IV.8.1, esto debido al período de oscilación menor del ramal de la válvula *a*.

Con respecto a la longitud del by-pass, en el gráfico No. IV.8.1 se observan sobrepresiones de menor magnitud para la longitud menor (modo B3.2).

IV.9 CASO C.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN

IV.9.1 Parámetros y características operacionales del caso C.1.

El esquema C.1 pertenece a un sistema hidráulico que se encuentra conformado por un tanque, una tubería principal y tres ramales “largos” al final de la tubería principal, cada uno con una válvula en sus extremos. Cada válvula se rige por una ley de cierre diferente. En este caso existen 52 modos de operación con la finalidad de determinar la influencia de cada ramal.

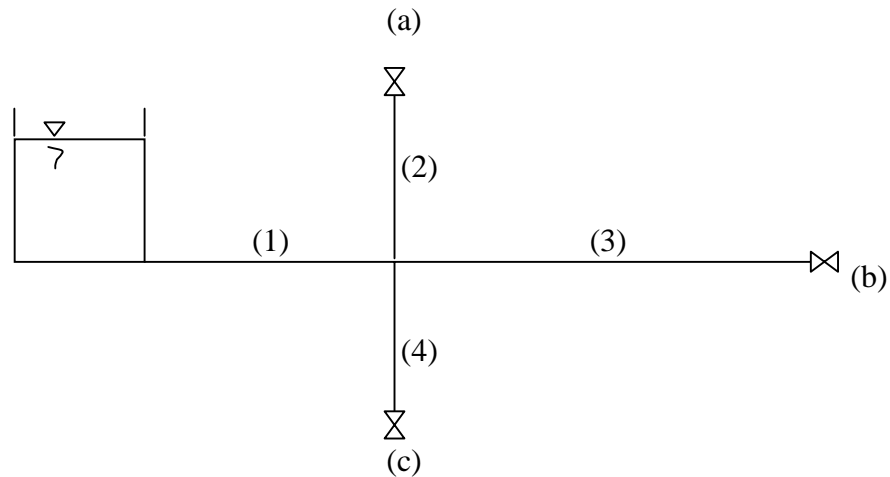


Figura No. IV.9.1: Esquema C.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 600 m
D1 = 0.5 m

L2 = 600 m
D2 = 0.5 m

L3 = 1200 m
D3 = 0.5 m

L4 = 600 m
D4 = 0.25 m

Tabla No. IV.9.1: Caso C.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte).

Modos	Válvula a	tc(seg)	τ_i	Válvula b	tc(seg)	τ_i	Válvula c	tc(seg)	τ_i
C.1.1	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.2	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.3	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
C.1.4	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
C.1.5	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
C.1.6	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
C.1.7	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
C.1.8	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
C.1.9	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.10	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00

C.1.11	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.12	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.13	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00
C.1.14	T.C	TC	0.00	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00
C.1.15	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00
C.1.16	T.C	TC	0.00	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00
C.1.17	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.18	T.A	TA	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.19	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00
C.1.20	T.A	TA	1.00	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00
C.1.21	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.22	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.23	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50
C.1.24	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.P.P	1.00	0.50
C.1.25	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.26	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.27	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50
C.1.28	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.P	1.00	0.50
C.1.29	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.30	T.C	TC	0.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.31	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
C.1.32	T.C	TC	0.00	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
C.1.33	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.34	T.A	TA	1.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.35	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
C.1.36	T.A	TA	1.00	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
C.1.37	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.38	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.39	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50
C.1.40	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00	C.P.P	1.00	0.50
C.1.41	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00
C.1.42	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.A	2.00	1.00
C.1.43	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50
C.1.44	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00	C.P.P	1.00	0.50
C.1.45	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00
C.1.46	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00
C.1.47	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00
C.1.48	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00
C.1.49	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.50	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00
C.1.51	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00
C.1.52	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00

Leyes de cierre de las válvulas:

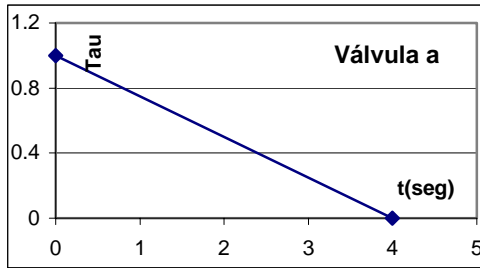


Figura No. IV.9.2: Ley de cierre de la válvula a.

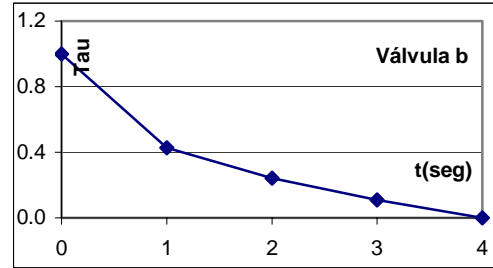


Figura No. IV.9.3: Ley de cierre de la válvula b.

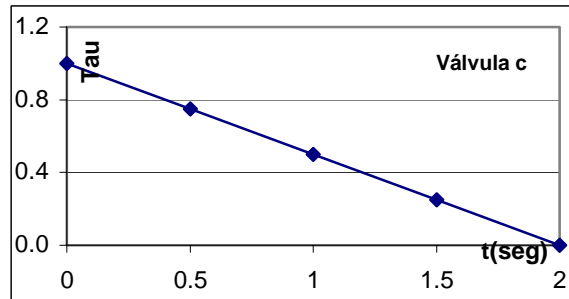


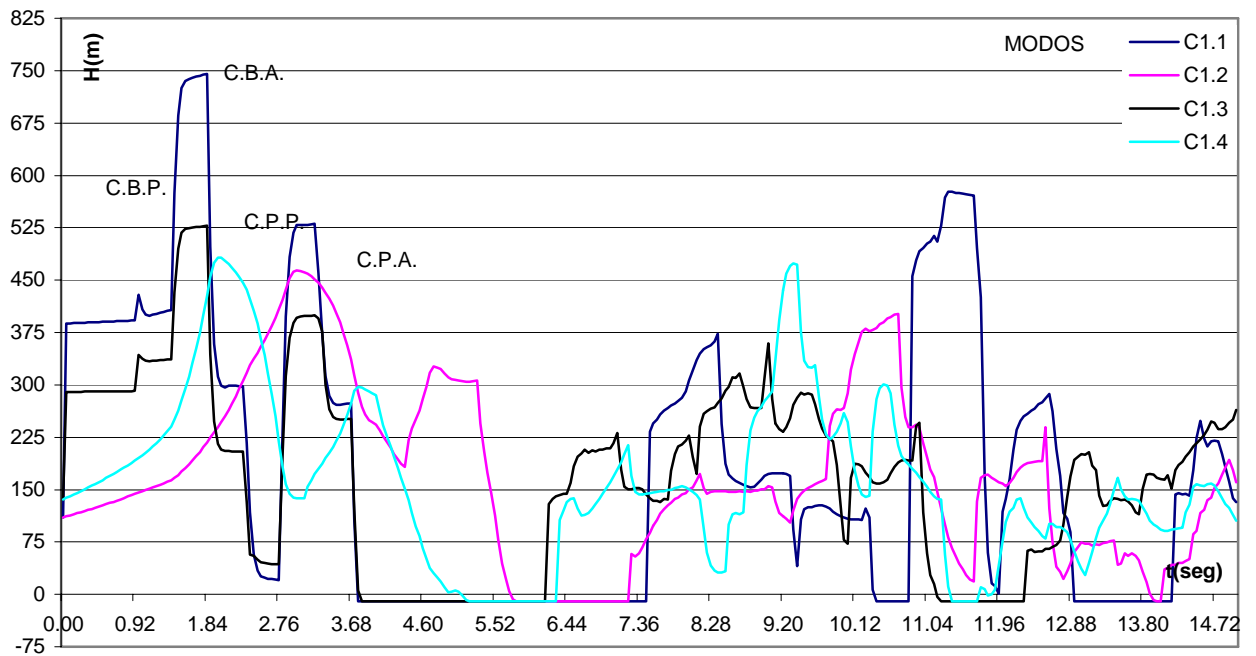
Figura No. IV.9.4: Ley de cierre de la válvula c.

Tabla No. IV.9.2: Caso C.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.

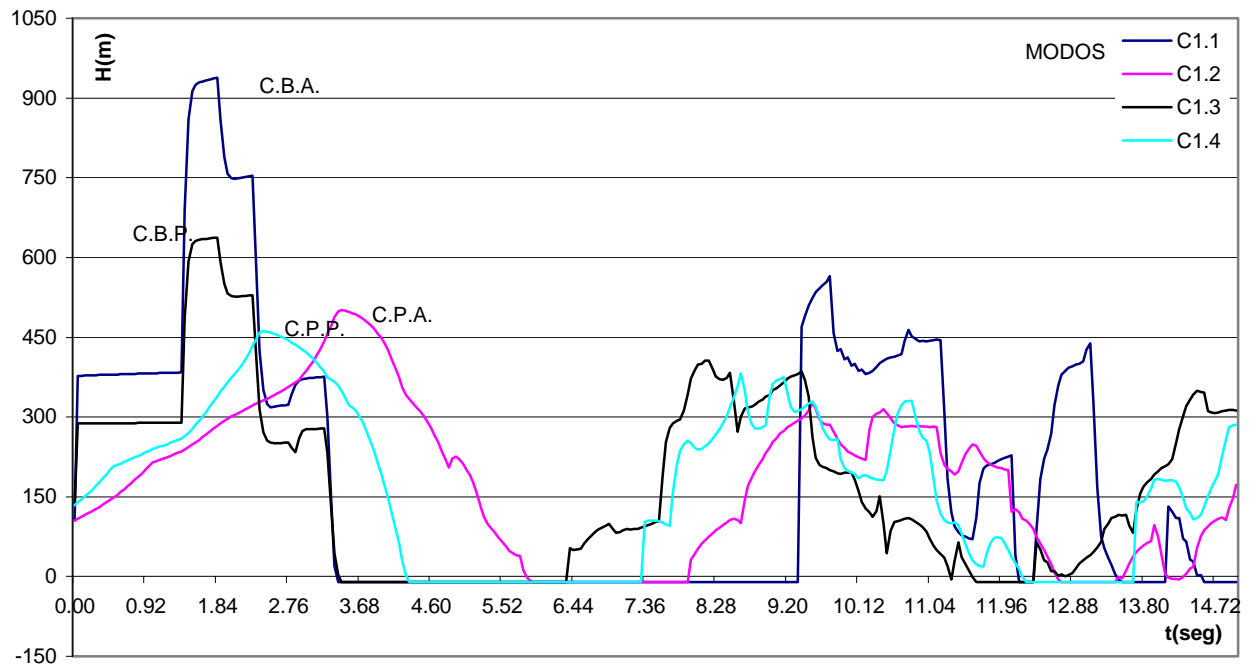
Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	H0(a) (m)	Q03 (m ³ /s)	H0(b) (m)	Q04 (m ³ /s)	H0(c) (m)
C.1.1	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.2	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.3	0.6634	0.2323	135.89	0.2310	134.38	0.2001	100.83
C.1.4	0.6634	0.2323	135.89	0.2310	134.38	0.2001	100.83
C.1.5	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00	0.0000	0.00
C.1.6	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00	0.0000	0.00
C.1.7	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00	0.0000	0.00
C.1.8	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00	0.0000	0.00
C.1.9	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.10	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.11	0.9333	0.2217	123.72	0.4269	114.71	0.2847	51.03
C.1.12	0.9333	0.2217	123.72	0.4269	114.71	0.2847	51.03

C.1.13	0.4580	0.0000	0.00	0.4580	132.03	0.0000	0.00
C.1.14	0.4580	0.0000	0.00	0.4580	132.03	0.0000	0.00
C.1.15	0.2400	0.0000	0.00	0.2400	145.06	0.0000	0.00
C.1.16	0.2400	0.0000	0.00	0.2400	145.06	0.0000	0.00
C.1.17	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.18	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.19	0.9399	0.4354	119.36	0.2201	122.00	0.2843	50.89
C.1.20	0.9399	0.4354	119.36	0.2201	122.00	0.2843	50.89
C.1.21	0.3089	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.3089	60.07
C.1.22	0.3089	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.3089	60.07
C.1.23	0.2082	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.2082	109.15
C.1.24	0.2082	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.2082	109.15
C.1.25	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.26	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.27	1.0306	0.4264	114.47	0.4175	109.71	0.1867	87.80
C.1.28	1.0306	0.4264	114.47	0.4175	109.71	0.1867	87.80
C.1.29	0.7377	0.0000	0.00	0.4425	123.27	0.2952	54.84
C.1.30	0.7377	0.0000	0.00	0.4425	123.27	0.2952	54.84
C.1.31	0.4420	0.0000	0.00	0.2368	141.22	0.2051	105.96
C.1.32	0.4420	0.0000	0.00	0.2368	141.22	0.2051	105.96
C.1.33	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.34	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.35	0.8600	0.4425	123.28	0.2237	126.02	0.1938	94.56
C.1.36	0.8600	0.4425	123.28	0.2237	126.02	0.1938	94.56
C.1.37	0.7462	0.4514	128.28	0.0000	0.00	0.2948	54.69
C.1.38	0.7462	0.4514	128.28	0.0000	0.00	0.2948	54.69
C.1.39	0.4432	0.2381	142.77	0.0000	0.00	0.2051	105.94
C.1.40	0.4432	0.2381	142.77	0.0000	0.00	0.2051	105.94
C.1.41	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.42	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.43	0.8531	0.2253	127.77	0.4338	118.46	0.1940	94.80
C.1.44	0.8531	0.2253	127.77	0.4338	118.46	0.1940	94.80
C.1.45	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54	0.0000	0.00
C.1.46	0.8735	0.4414	122.64	0.4321	117.54	0.0000	0.00
C.1.47	0.4736	0.2375	141.98	0.2361	140.41	0.0000	0.00
C.1.48	0.4736	0.2375	141.98	0.2361	140.41	0.0000	0.00
C.1.49	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.50	1.1018	0.4186	110.32	0.4098	105.73	0.2734	47.04
C.1.51	0.7518	0.2293	132.36	0.2280	130.89	0.2945	54.60
C.1.52	0.7518	0.2293	132.36	0.2280	130.89	0.2945	54.60

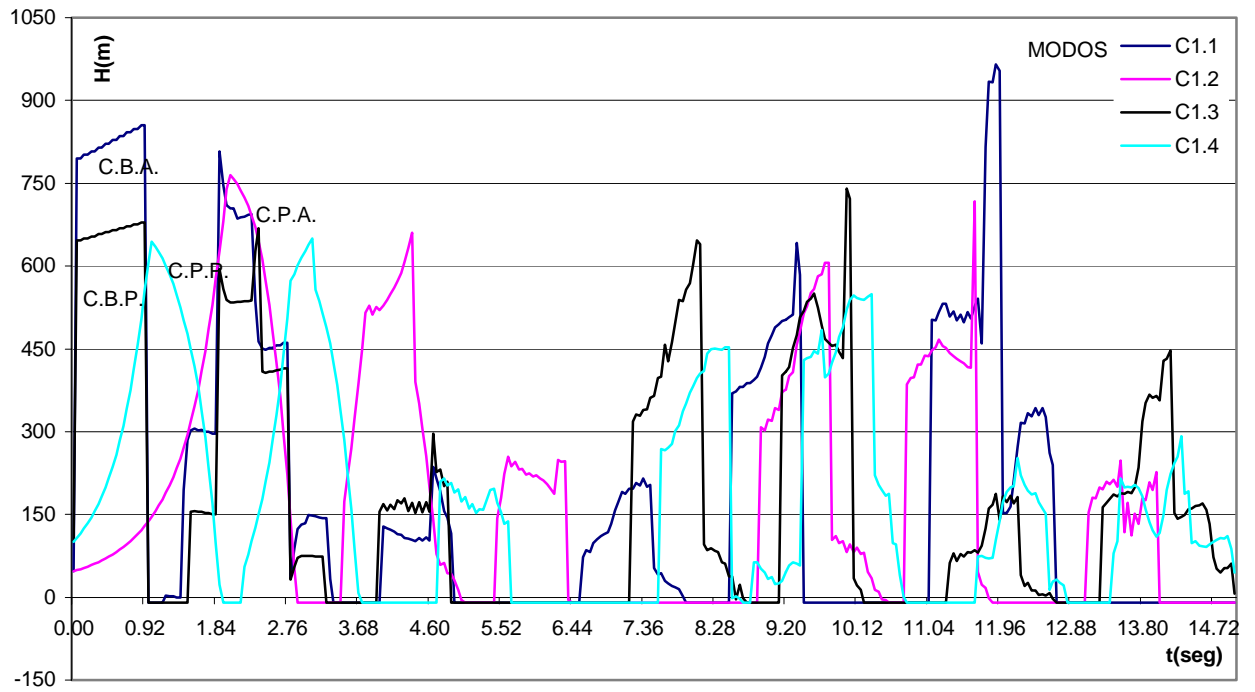
IV.9.2 Resultados obtenidos en el caso C.1.



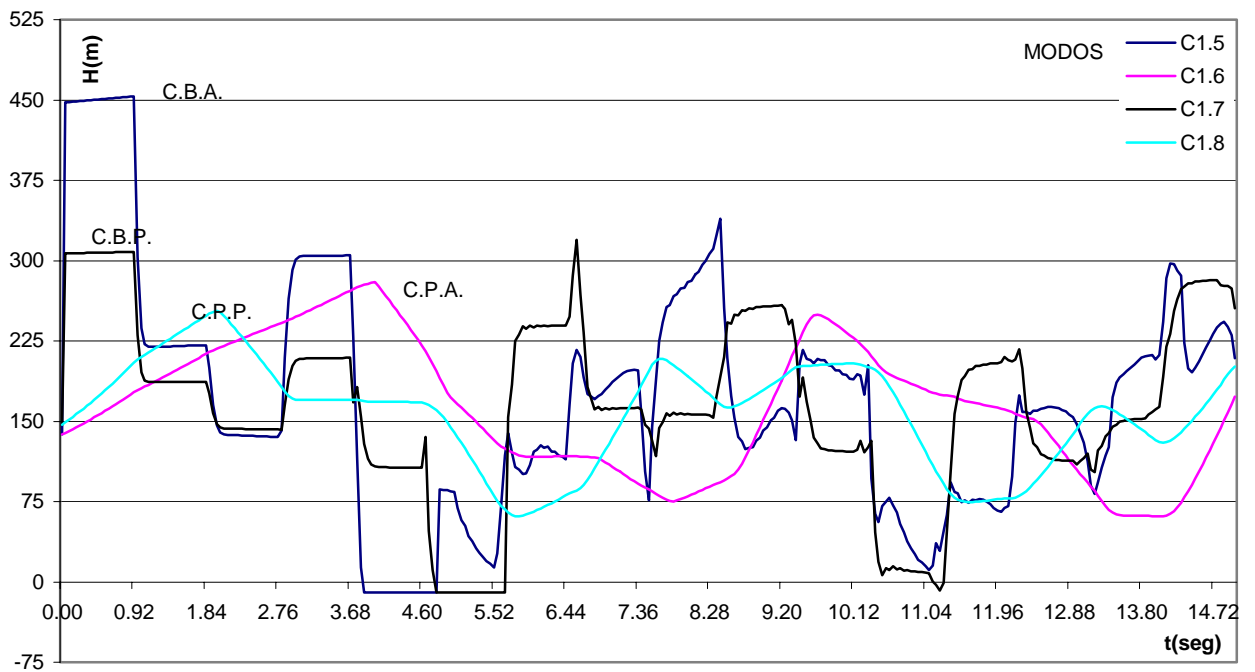
**Gráfico No. IV.9.1: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Todas las válvulas operando)**



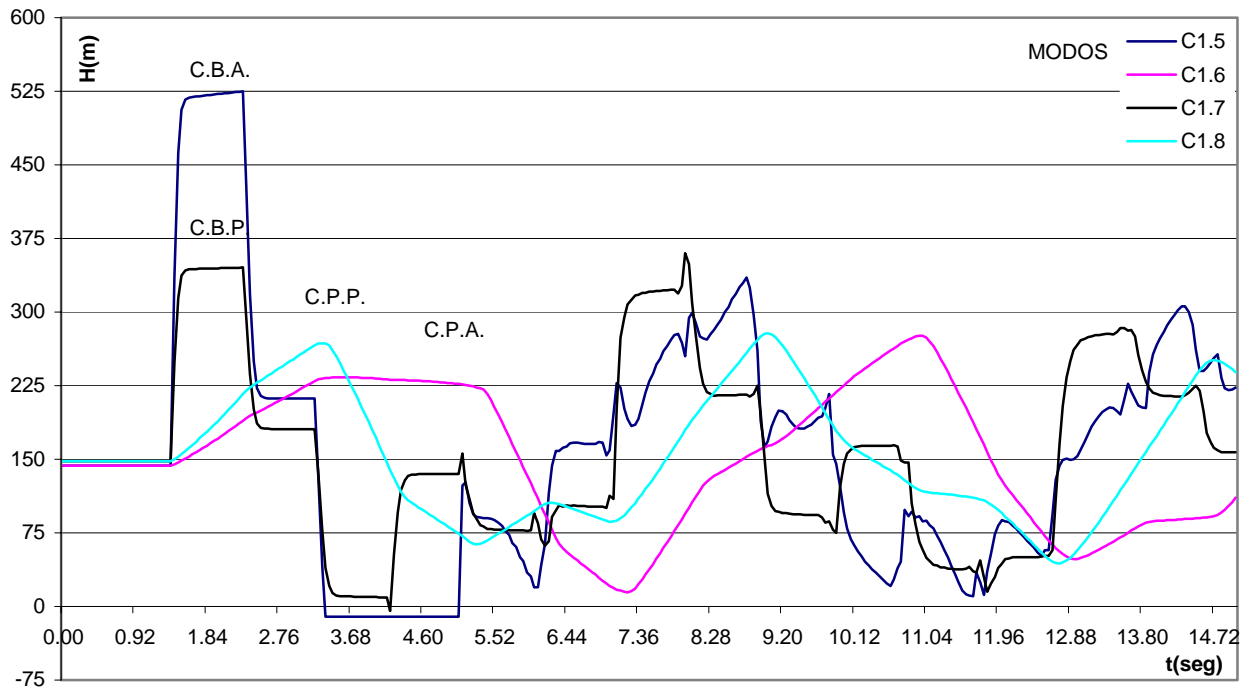
**Gráfico No. IV.9.2: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Todas las válvulas operando)**



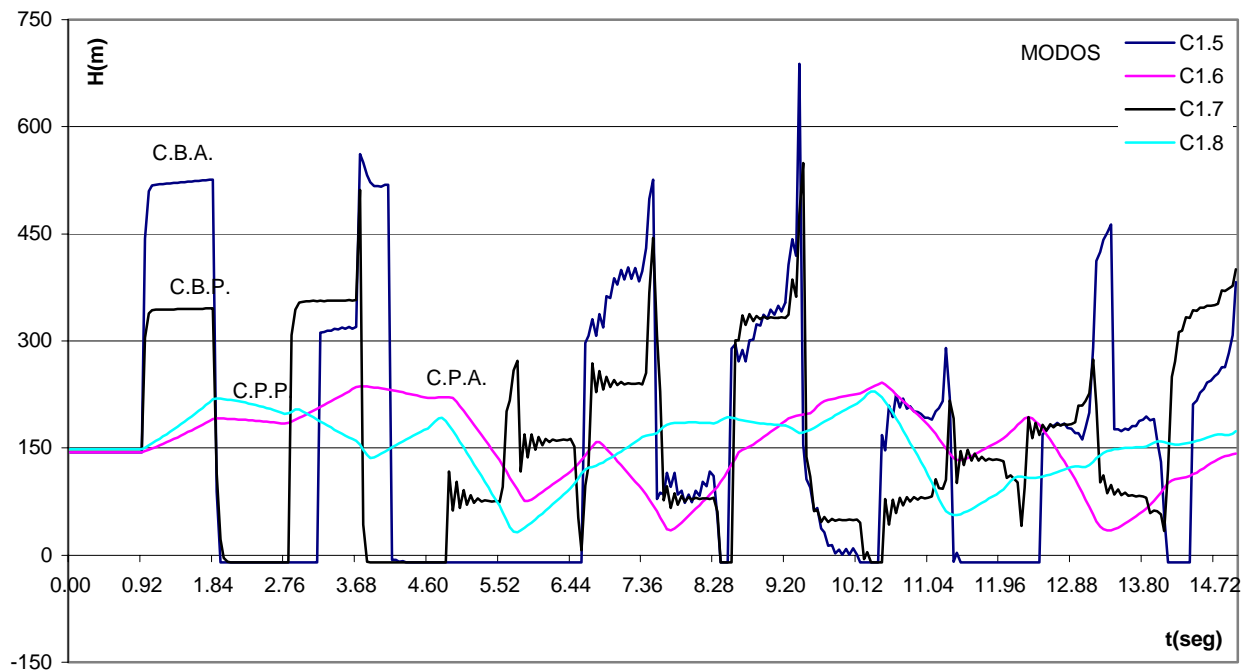
**Gráfico No. IV.9.3: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Todas las válvulas operando)**



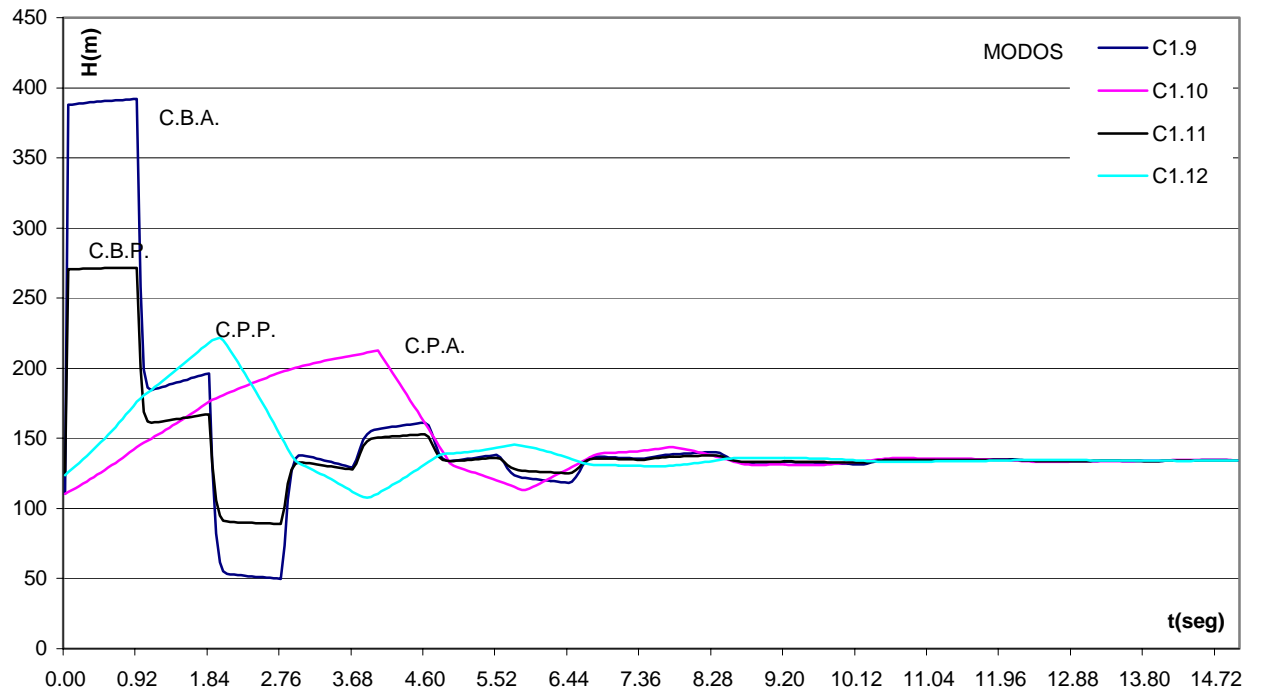
**Gráfico No. IV.9.4: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas b y c totalmente cerradas)**



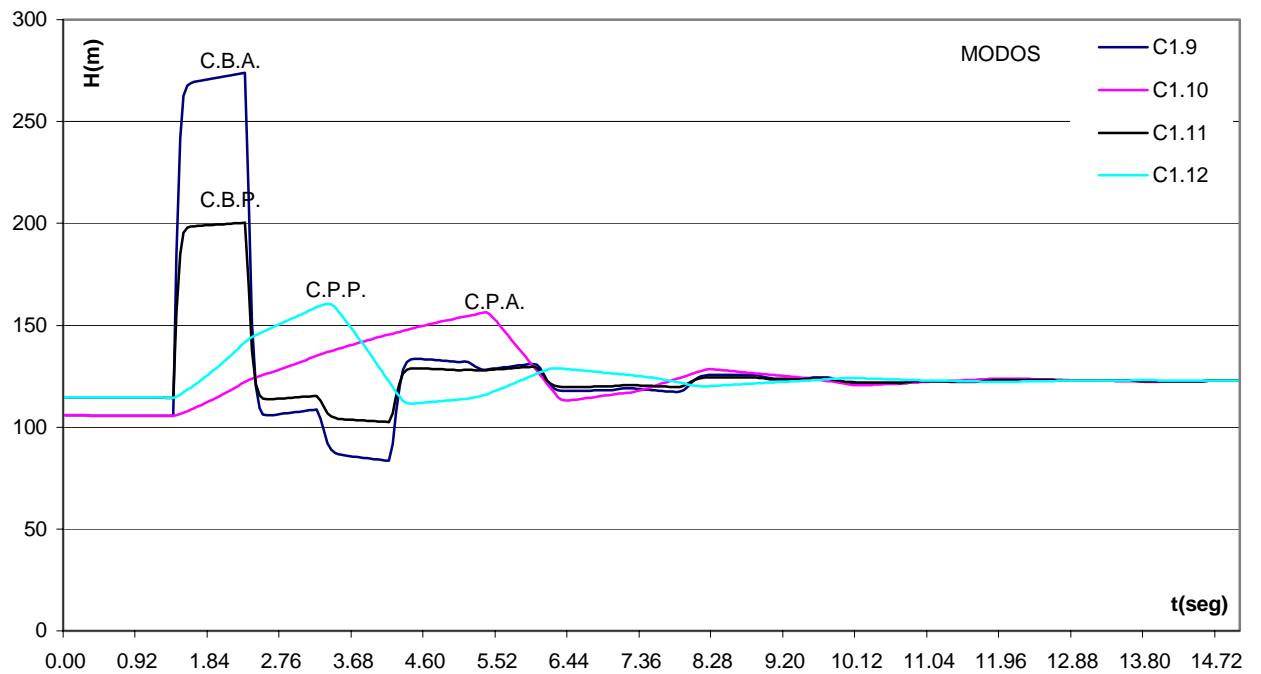
**Gráfico No. IV.9.5: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvulas b y c totalmente cerradas)**



**Gráfico No. IV.9.6: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvulas b y c totalmente cerradas)**



**Gráfico No. IV.9.7: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas b y c totalmente abiertas)**



**Gráfico No. IV.9.8: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvulas b y c totalmente abiertas)**

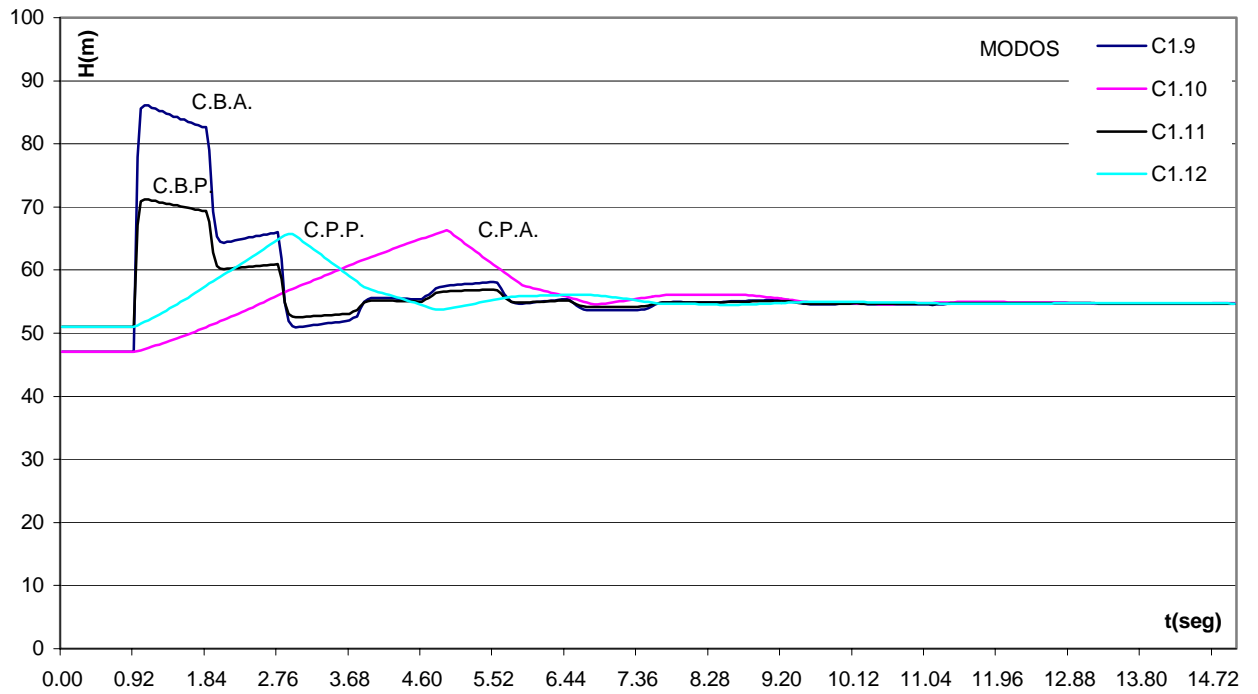


Gráfico No. IV.9.9: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvulas b y c totalmente abiertas)

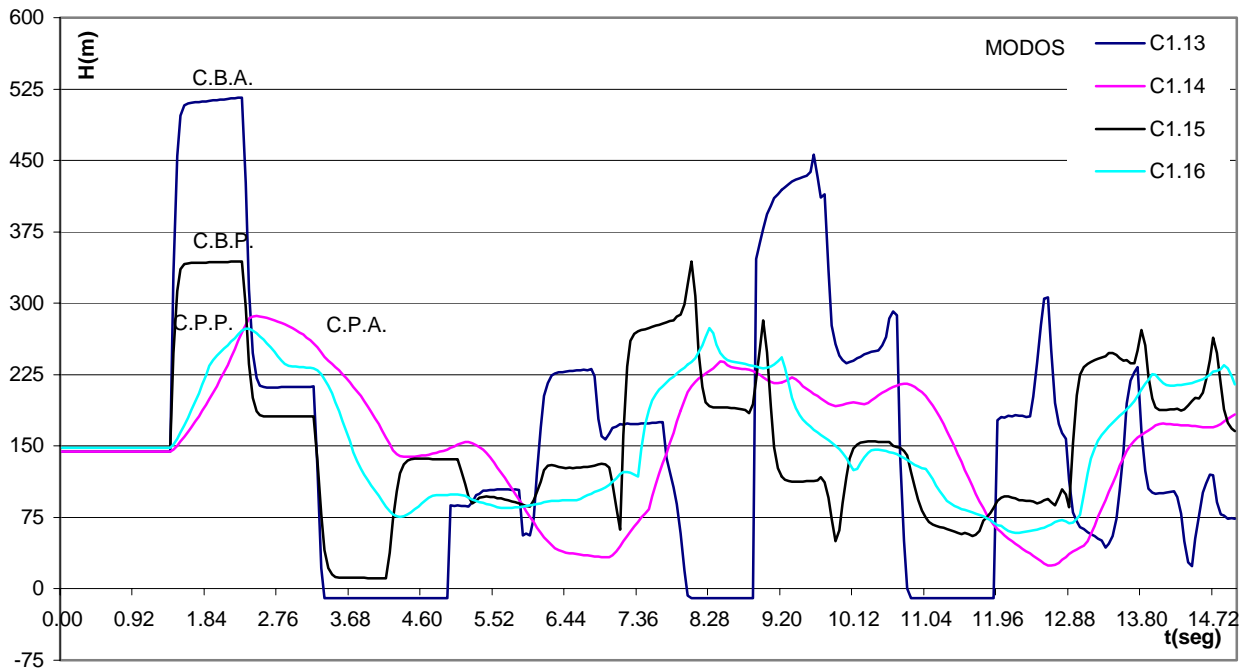
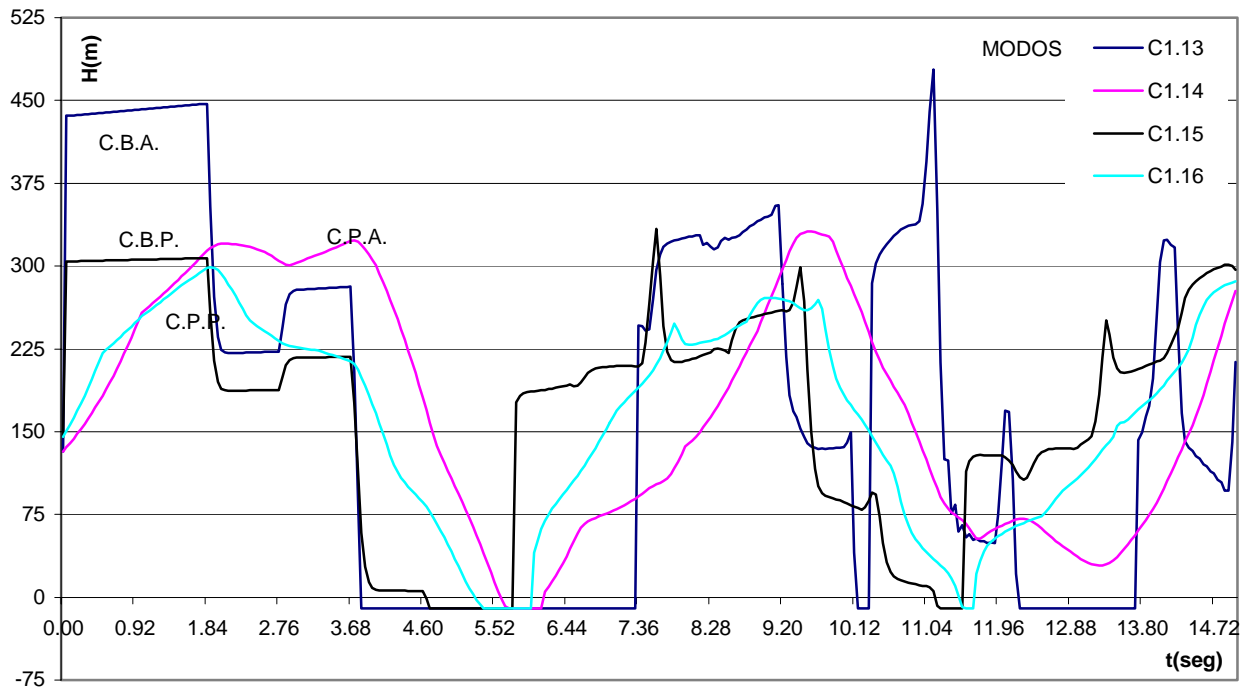
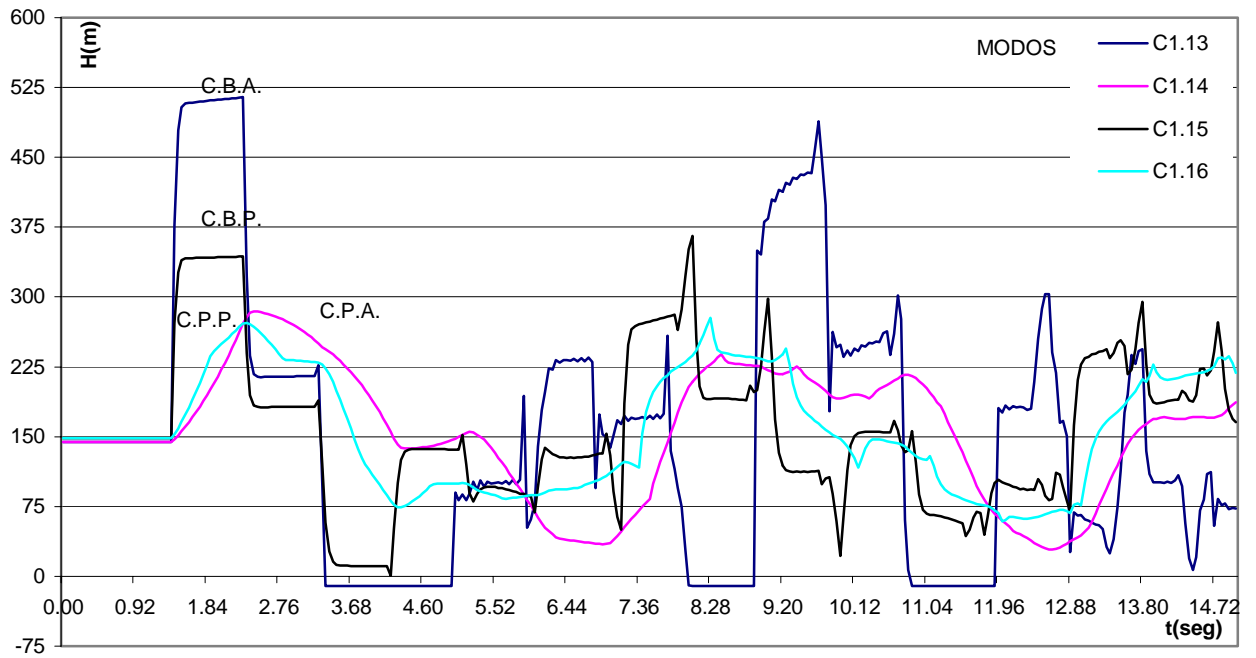


Gráfico No. IV.9.10: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas a y c totalmente cerradas)



**Gráfico No. IV.9.11: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvulas a y c totalmente cerradas)**



**Gráfico No. IV.9.12: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvulas a y c totalmente cerradas)**

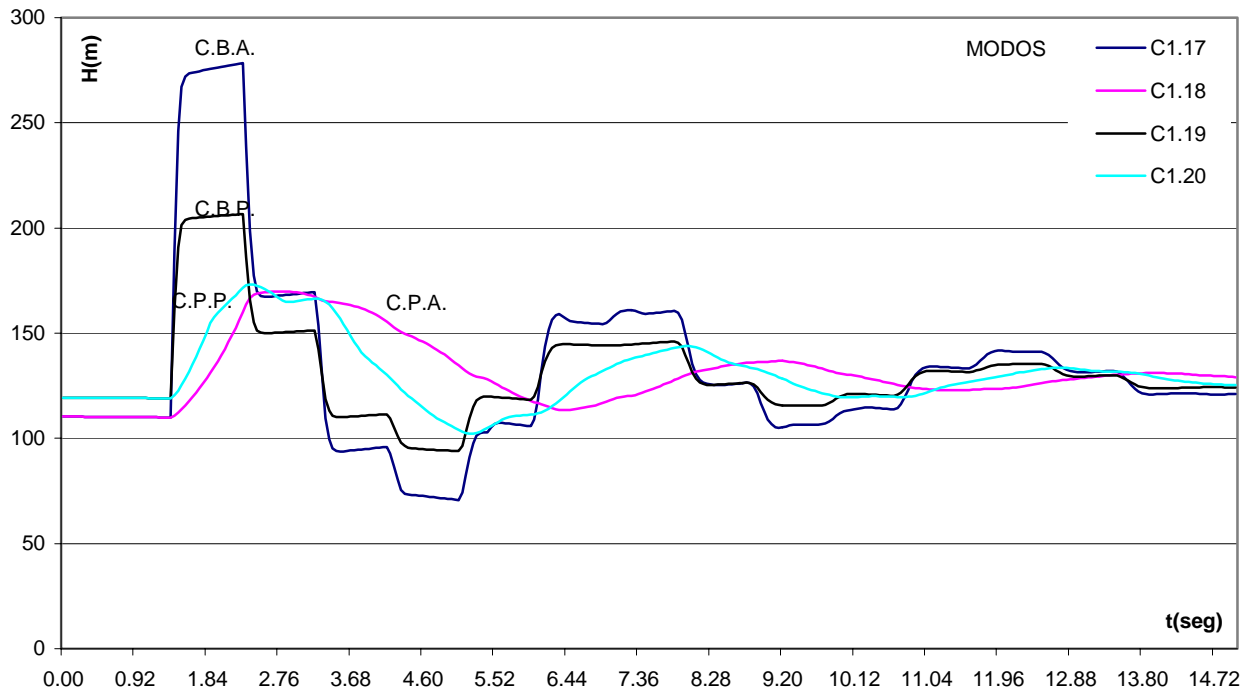


Gráfico No. IV.9.13: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas a y c totalmente abiertas)

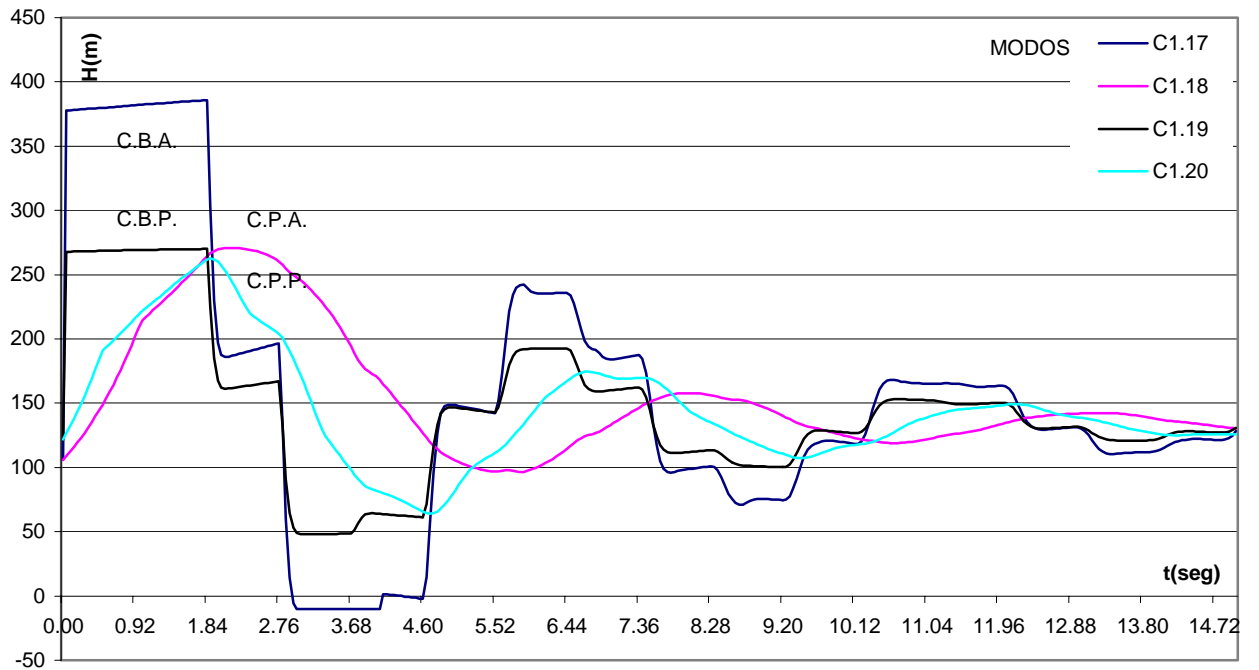


Gráfico No. IV.9.14: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvulas a y c totalmente abiertas)

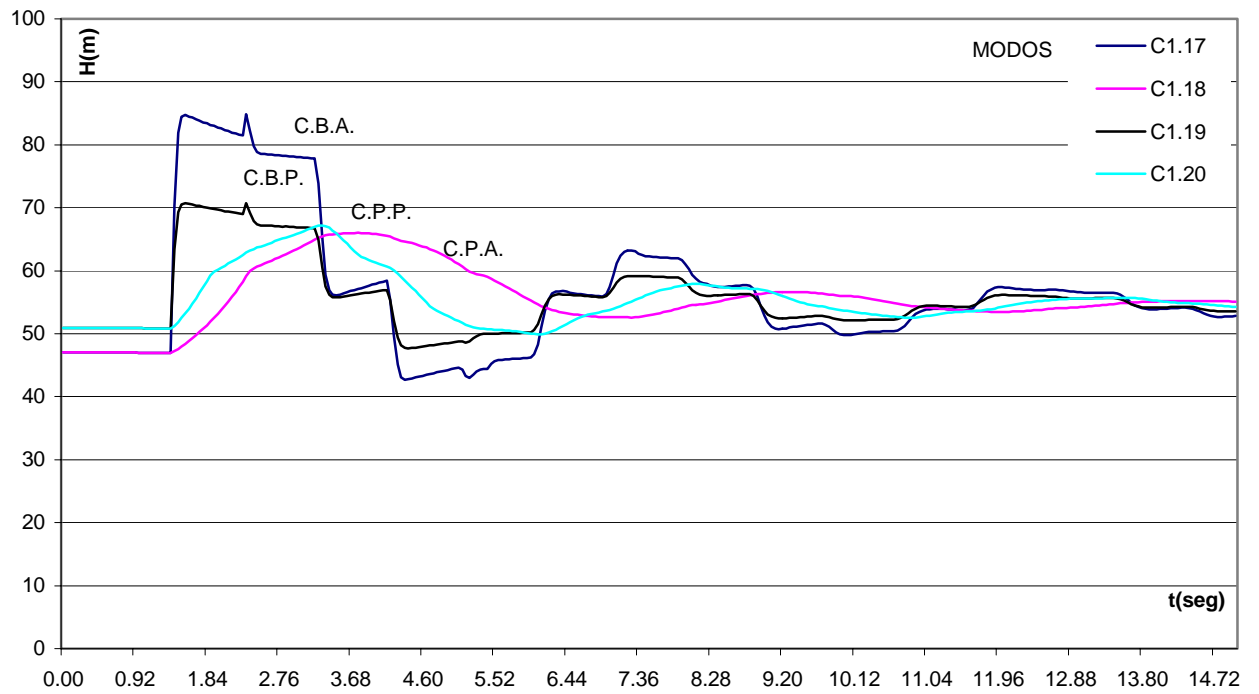


Gráfico No. IV.9.15: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvulas a y c totalmente abiertas)

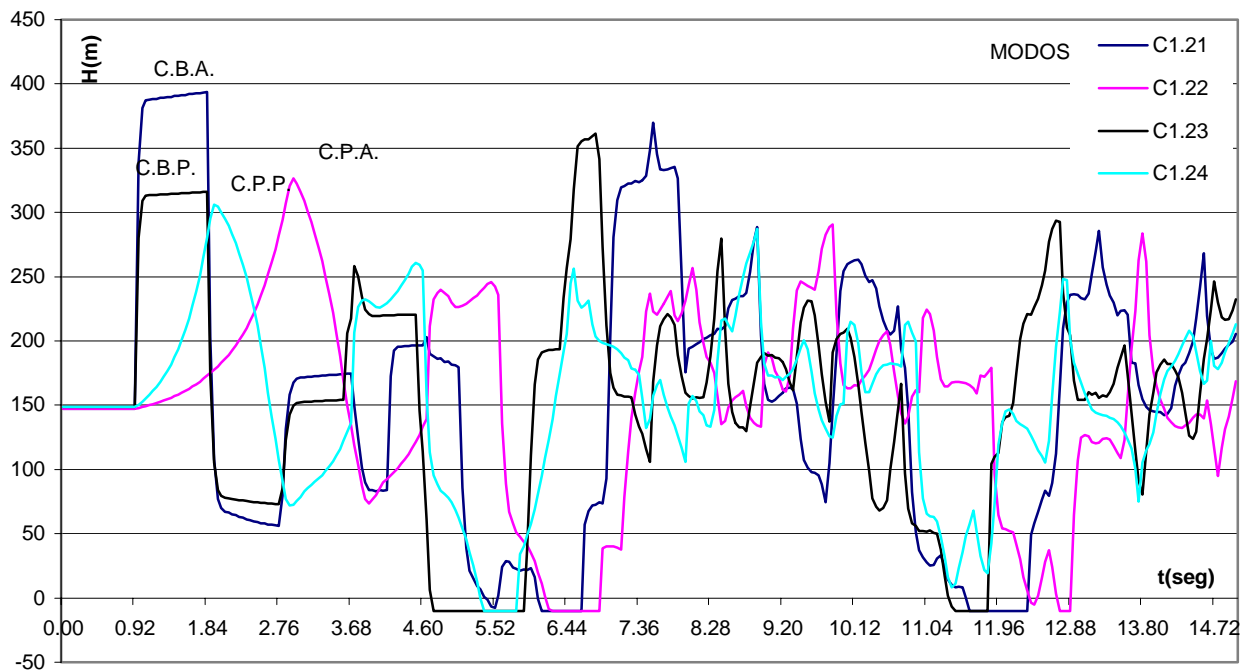


Gráfico No. IV.9.16: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas a y b totalmente cerradas)

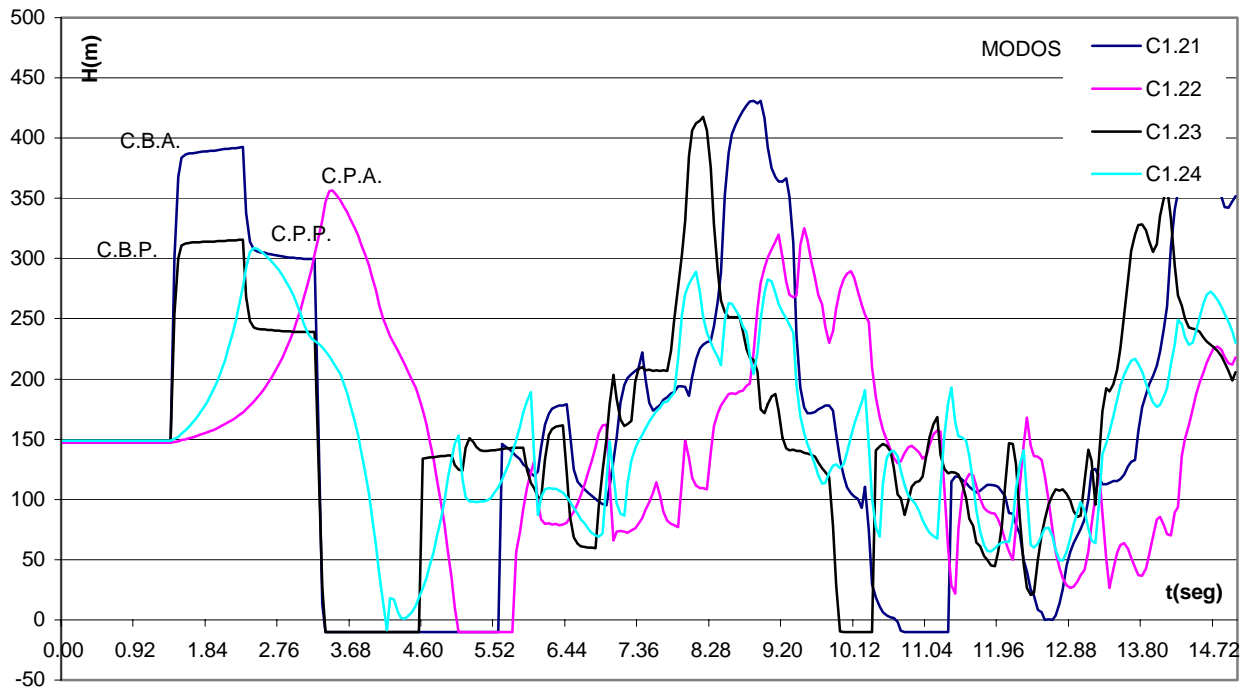


Gráfico No. IV.9.17: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvulas a y b totalmente cerradas)

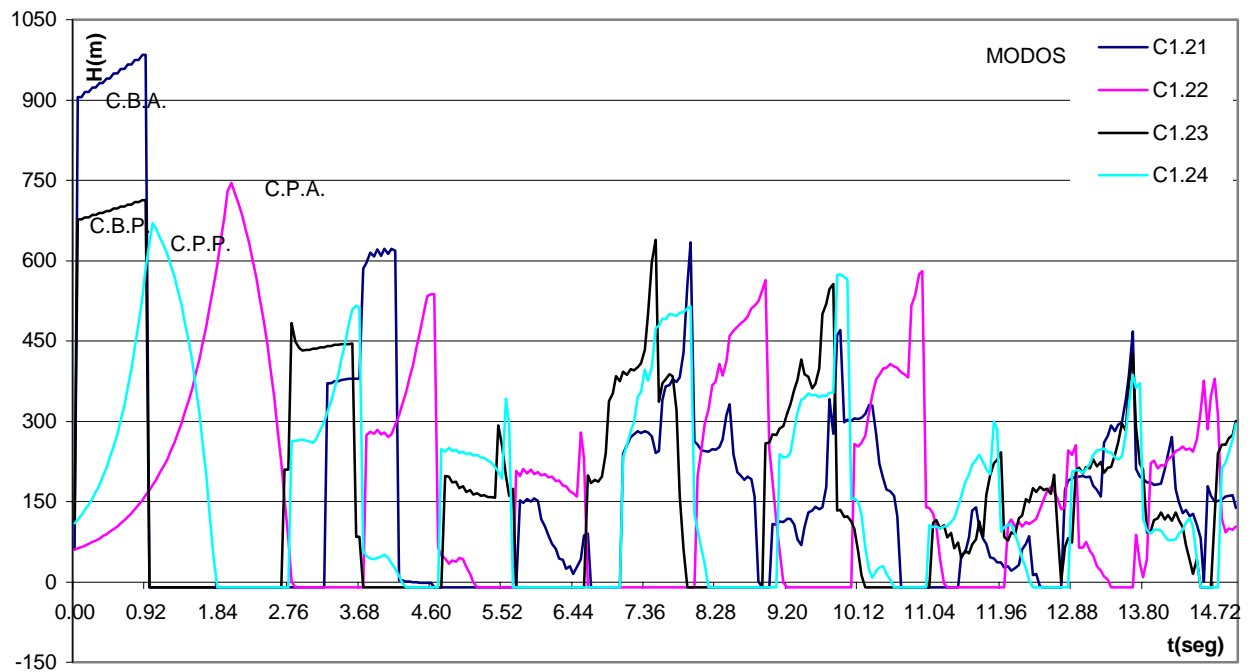


Gráfico No. IV.9.18: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvulas a y b totalmente cerradas)

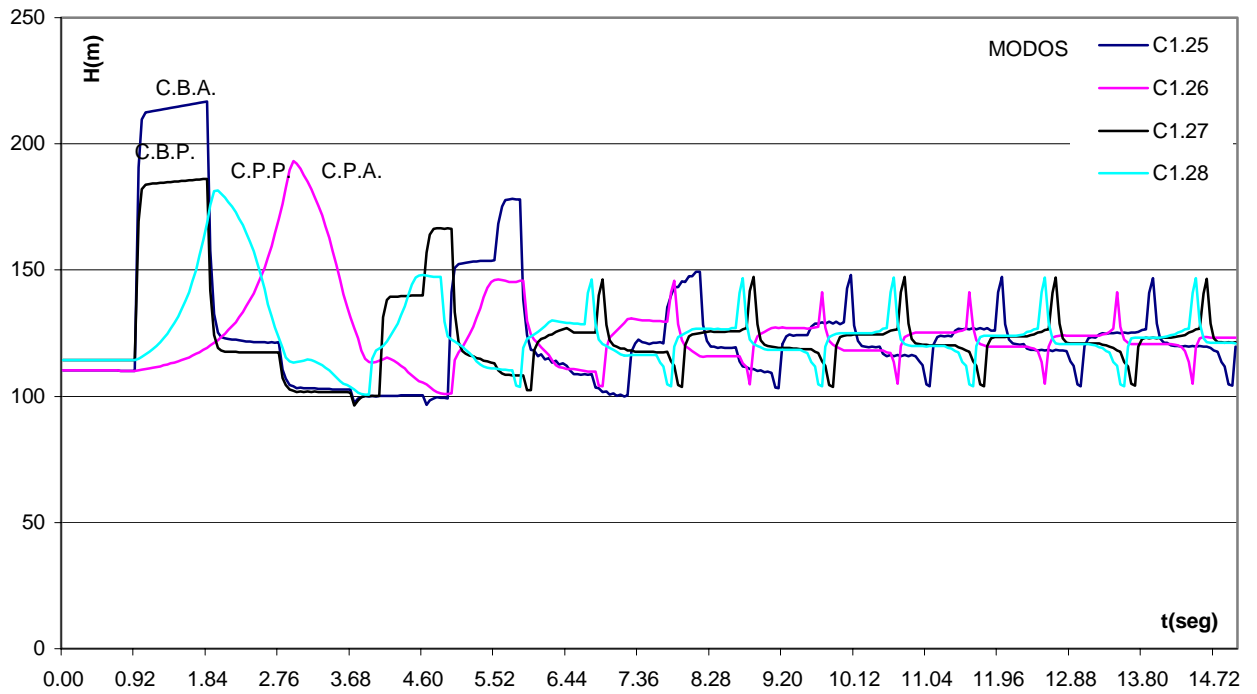


Gráfico No. IV.9.19: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvulas a y b totalmente abiertas)

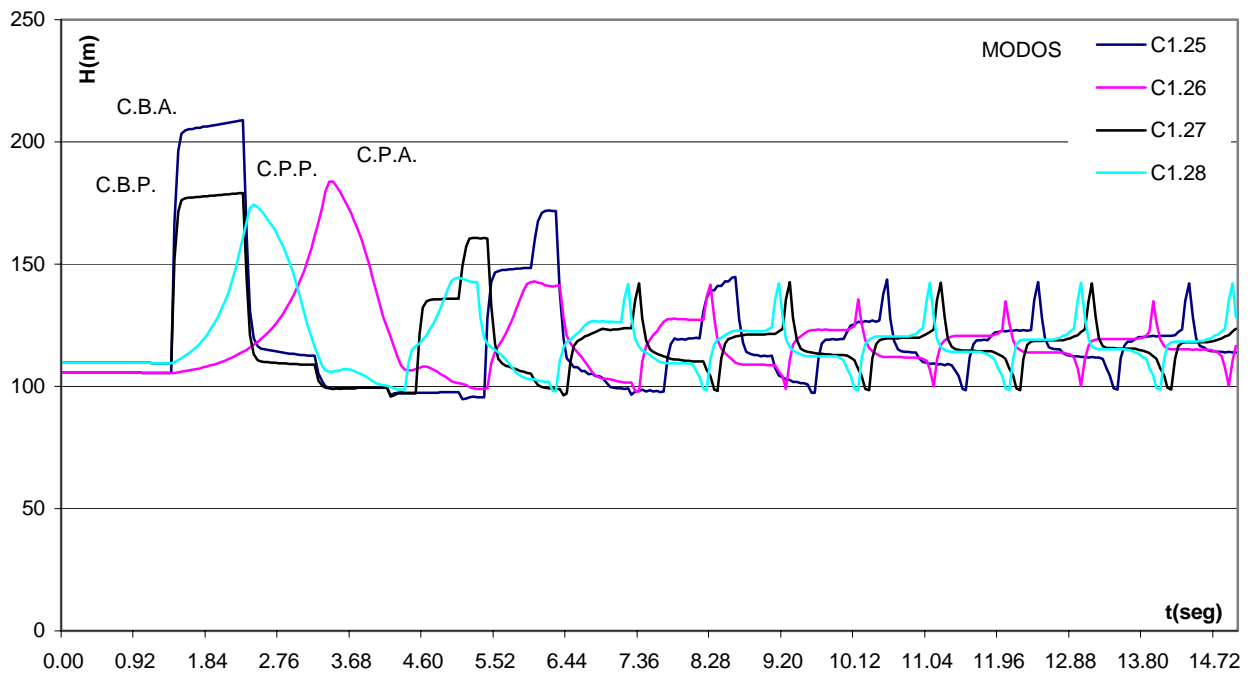
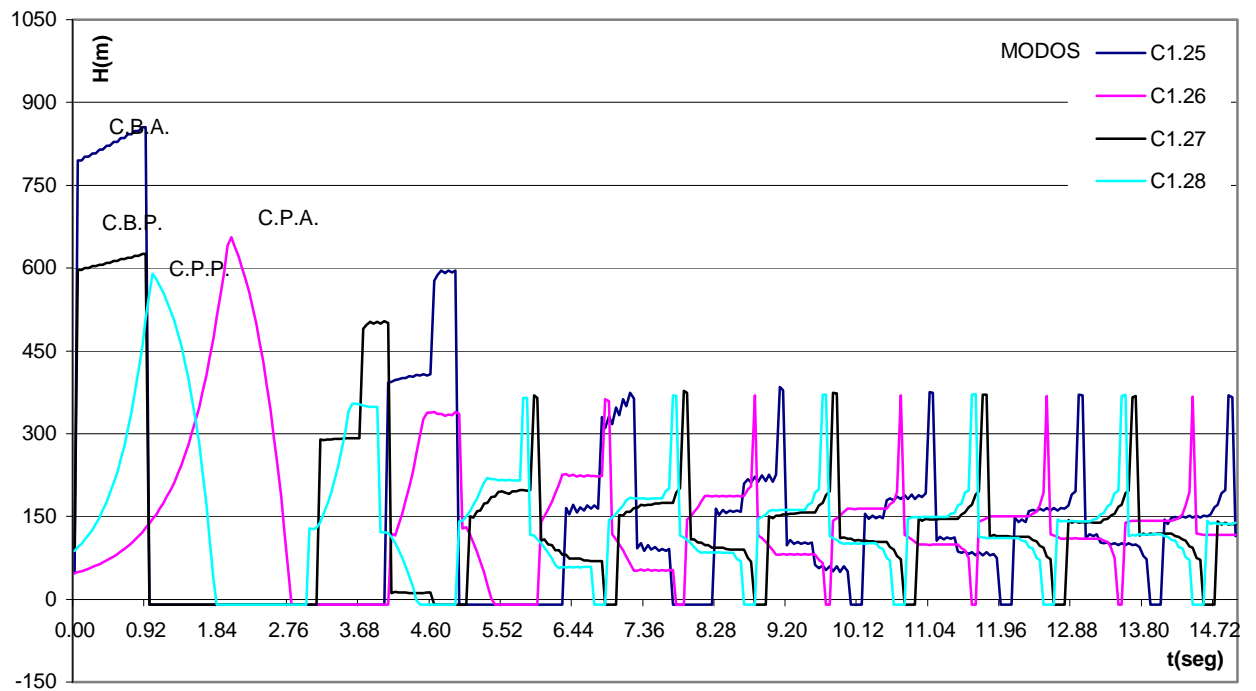
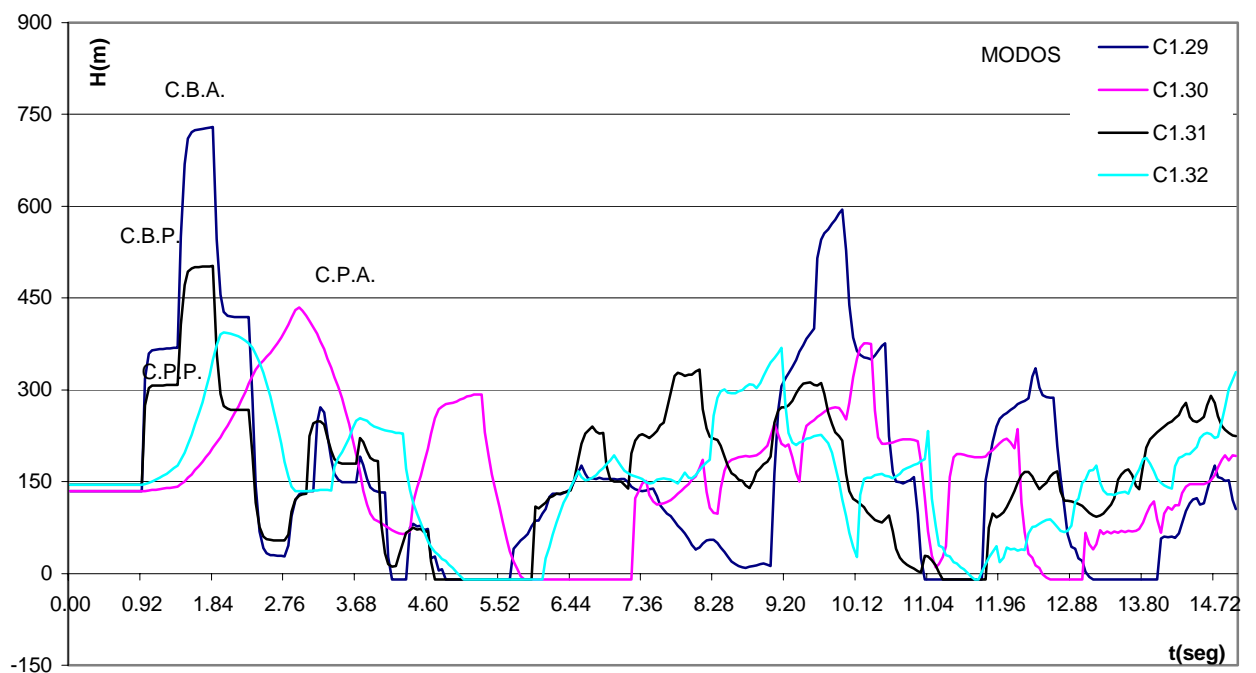


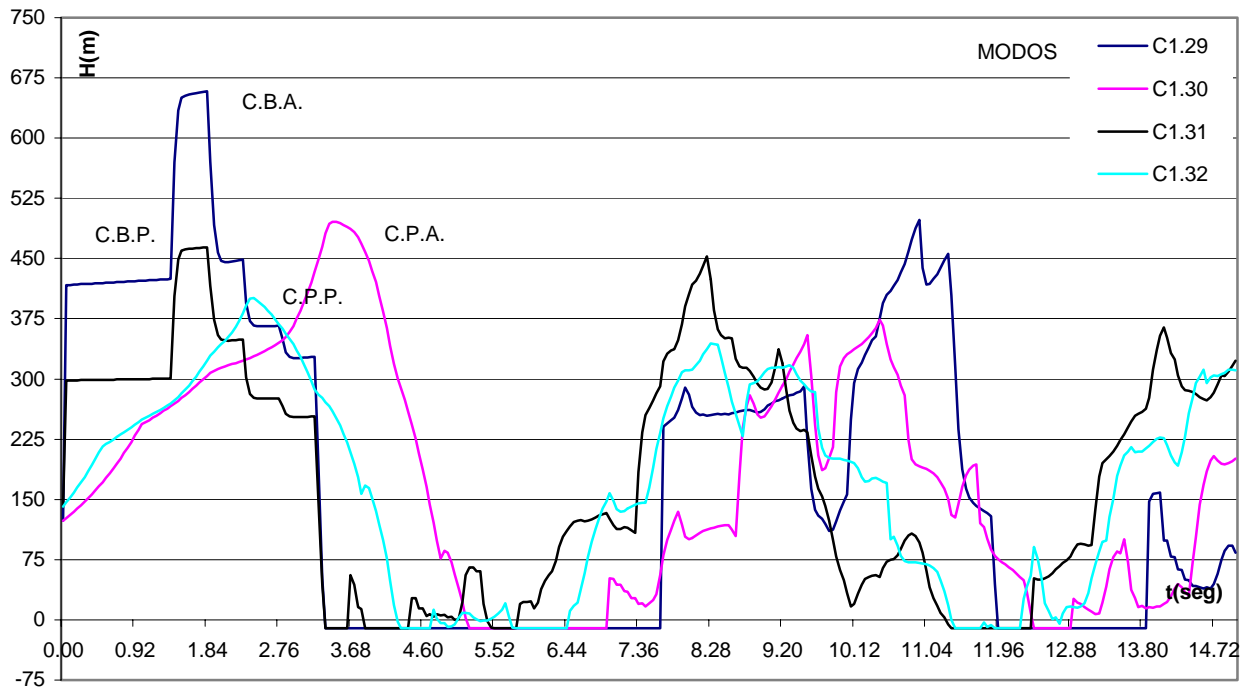
Gráfico No. IV.9.20: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvulas a y b totalmente abiertas)



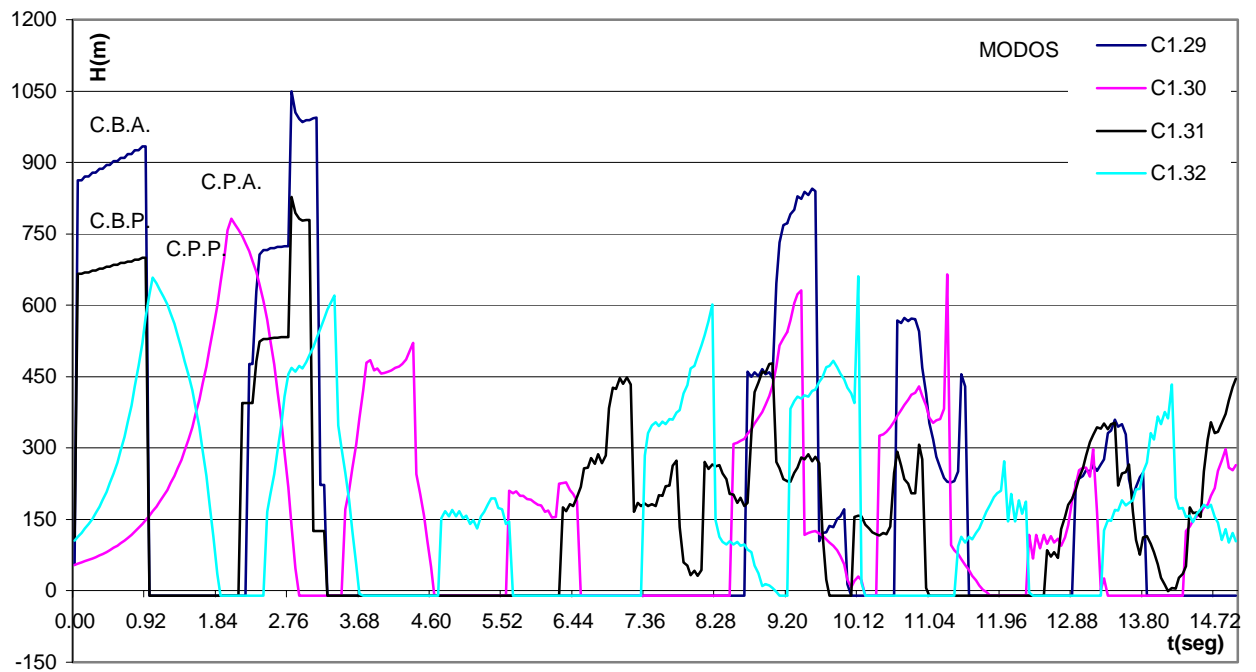
**Gráfico No. IV.9.21: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvulas a y b totalmente abiertas)**



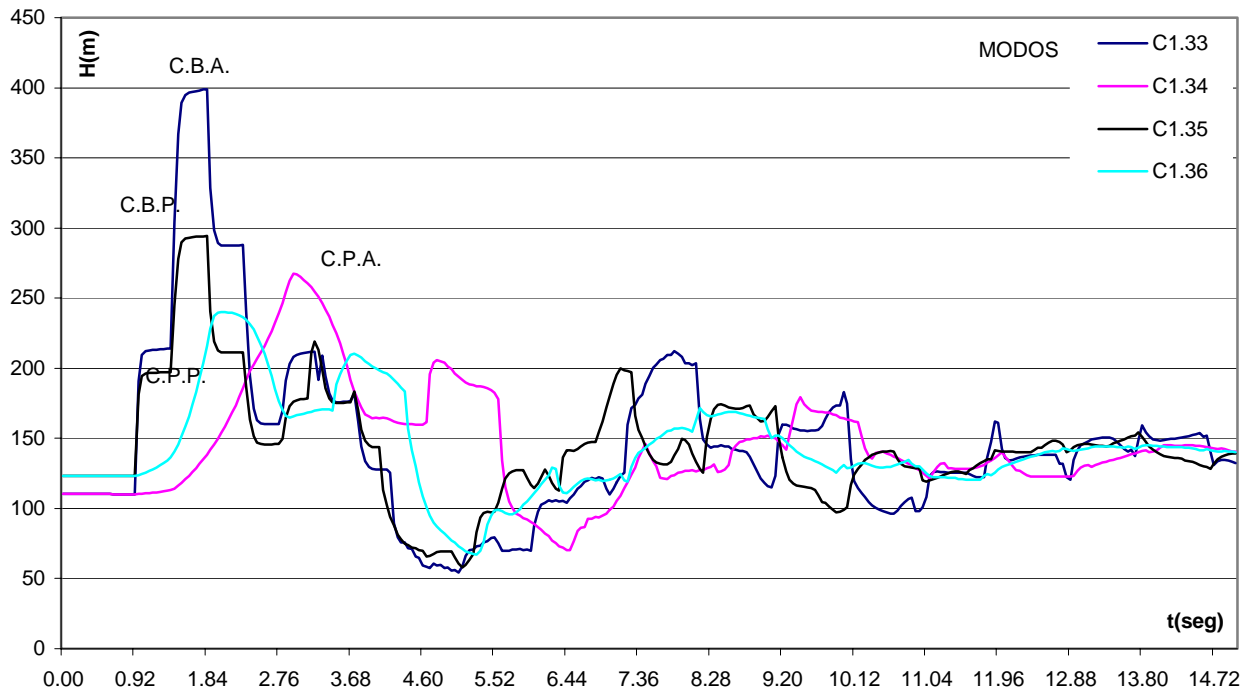
**Gráfico No. IV.9.22: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula a totalmente cerrada)**



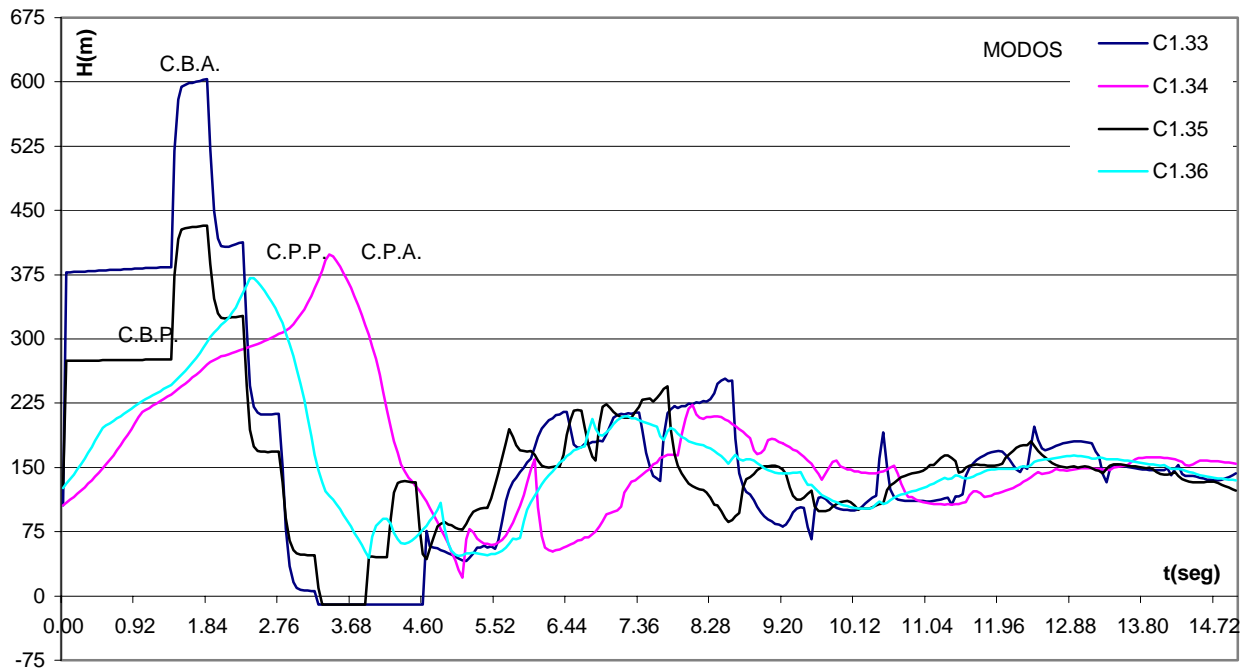
**Gráfico No. IV.9.23: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula a totalmente cerrada)**



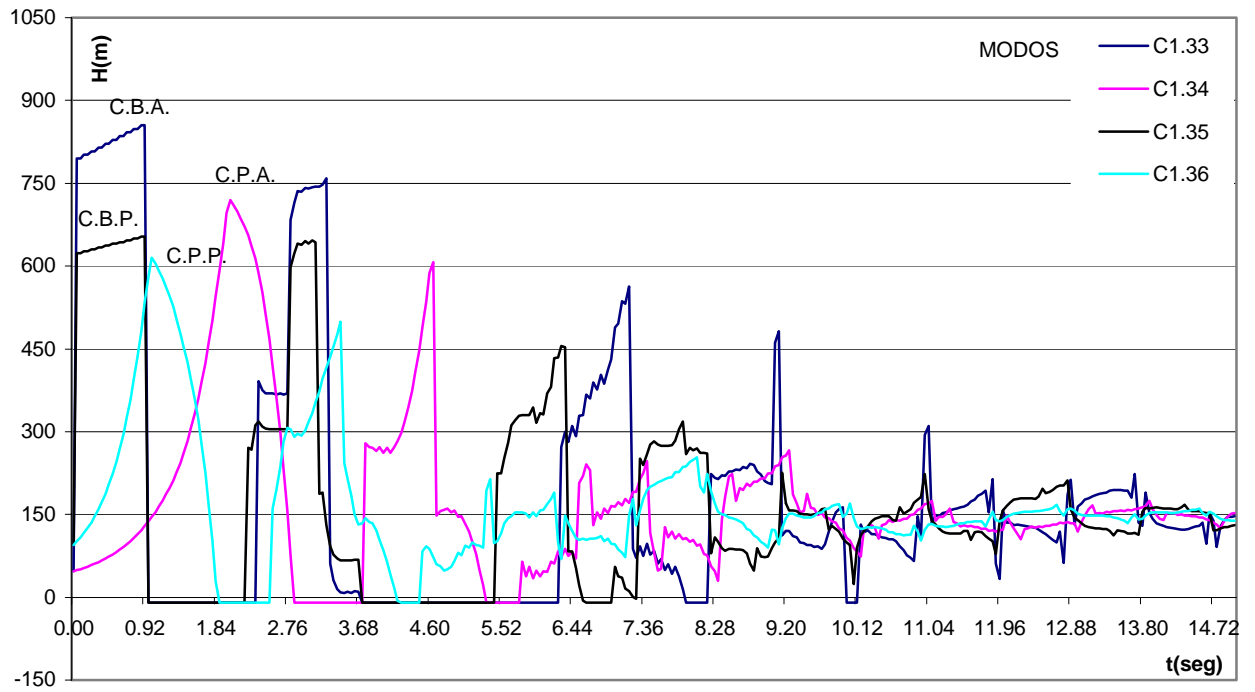
**Gráfico No. IV.9.24: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvula a totalmente cerrada)**



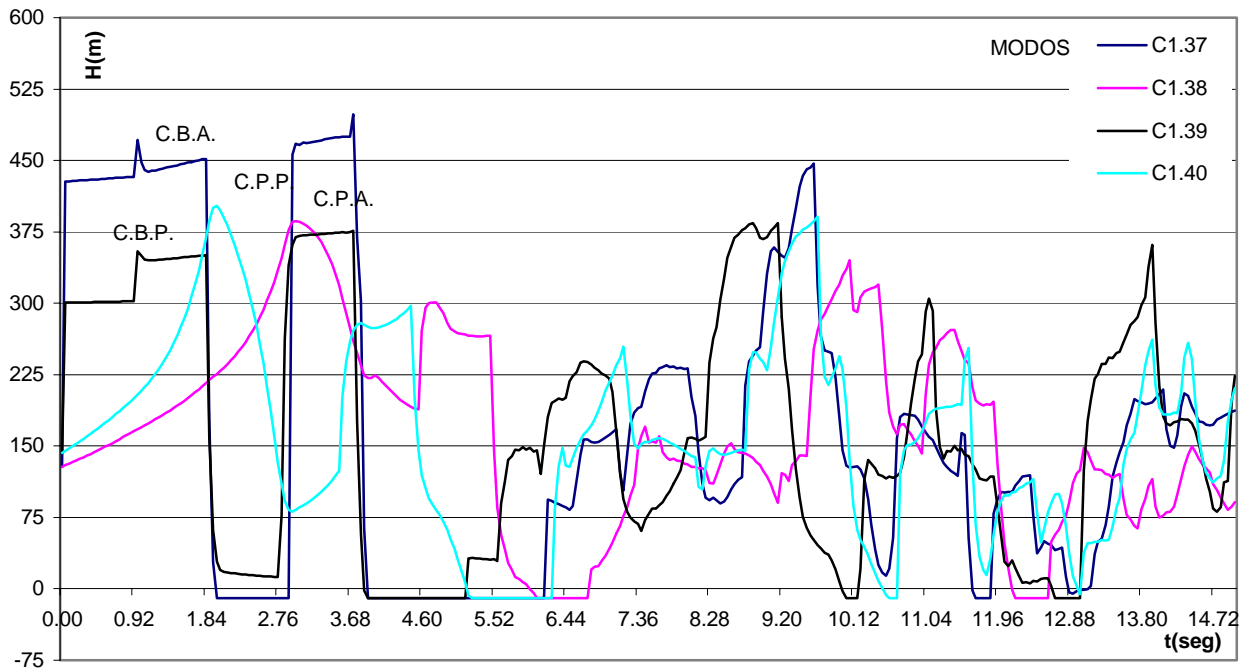
**Gráfico No. IV.9.25: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula a totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.9.26: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula a totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.9.27: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvula a totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.9.28: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula b totalmente cerrada)**

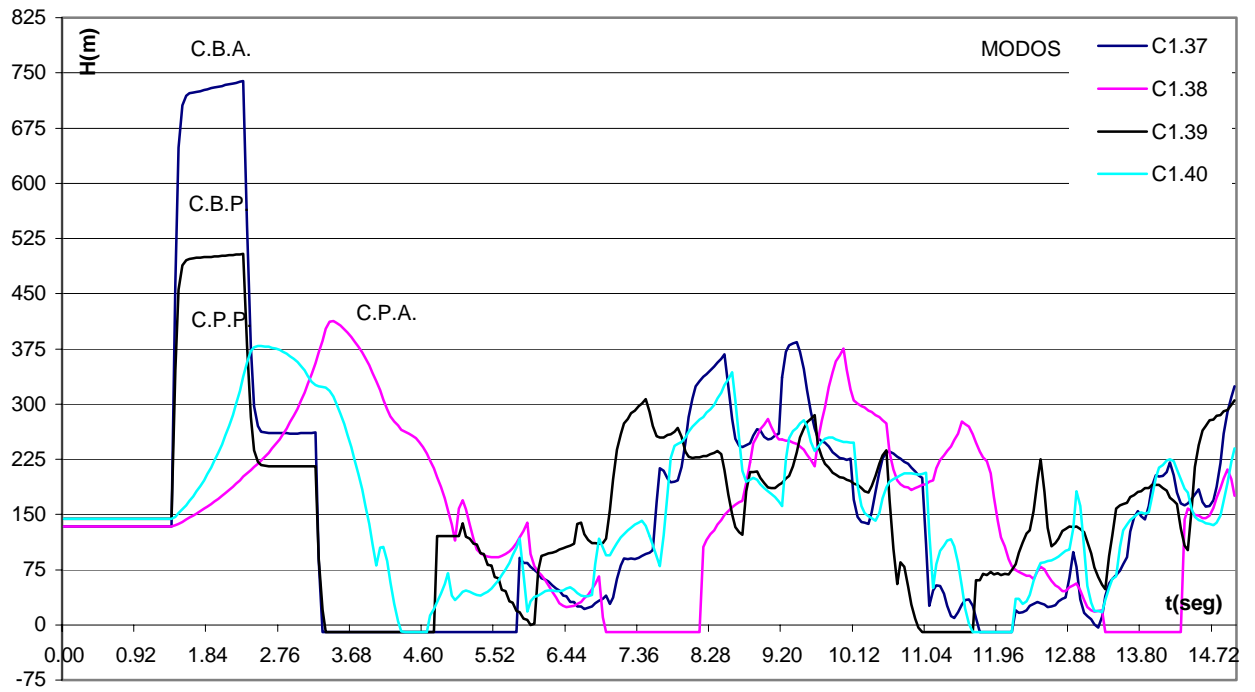


Gráfico No. IV.9.29: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula b totalmente cerrada)

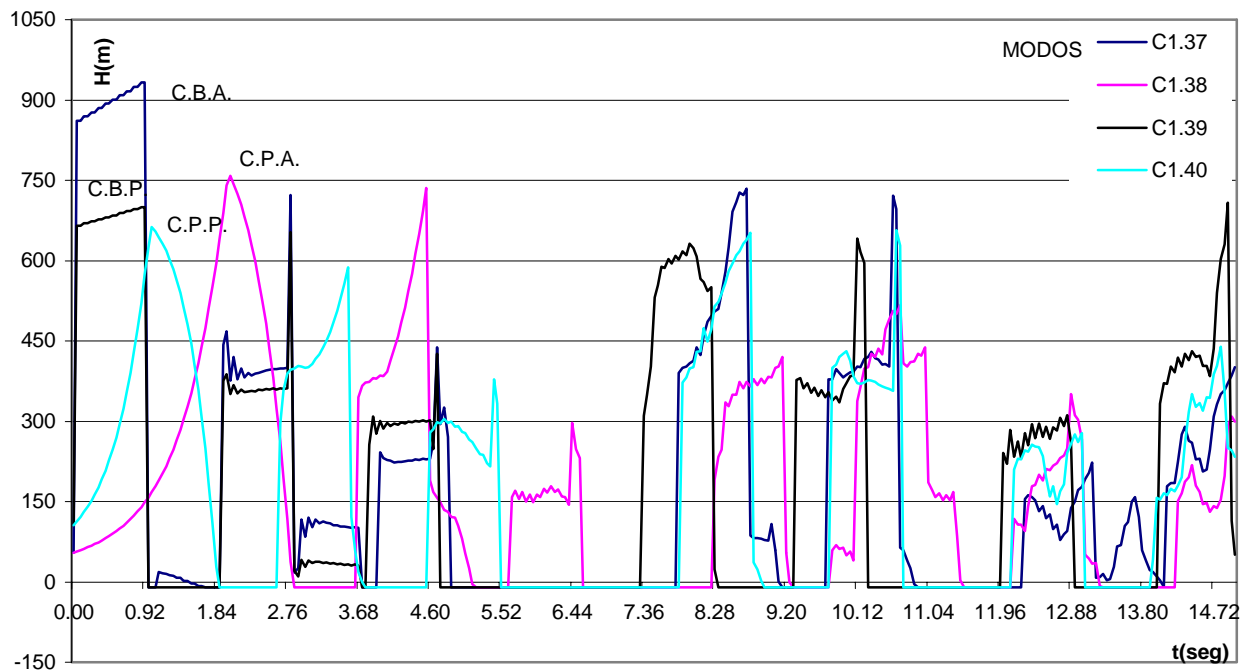
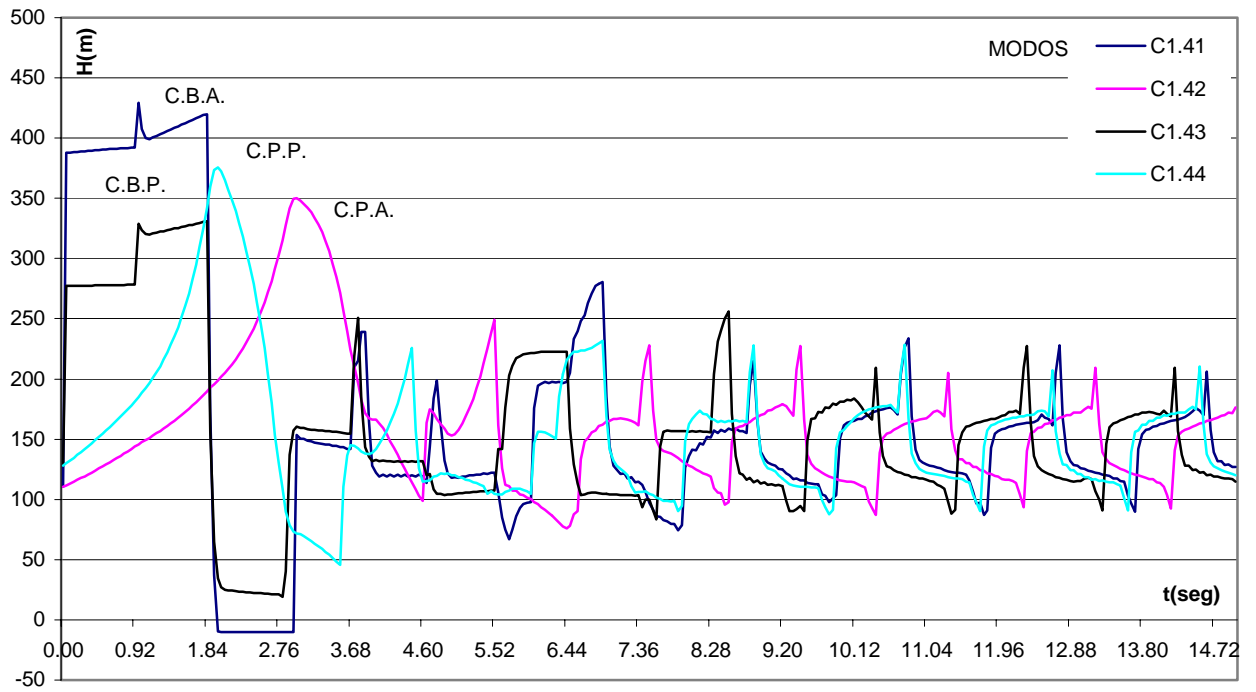
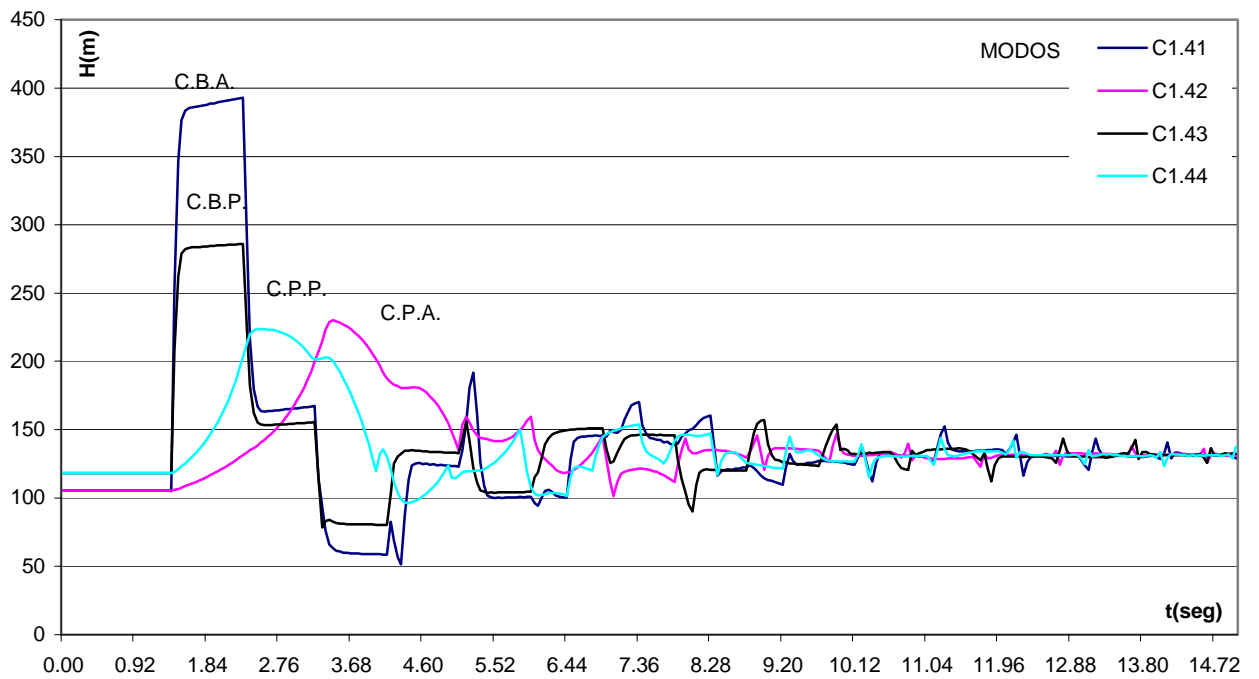


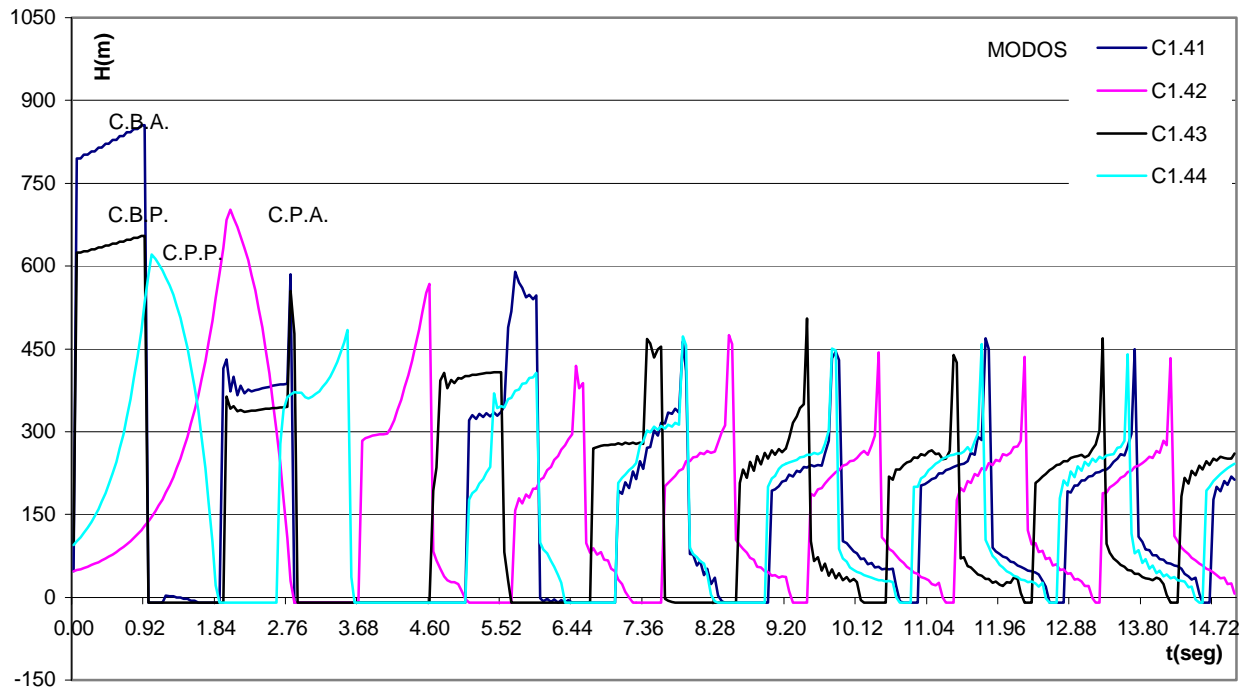
Gráfico No. IV.9.30: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c. (Válvula b totalmente cerrada)



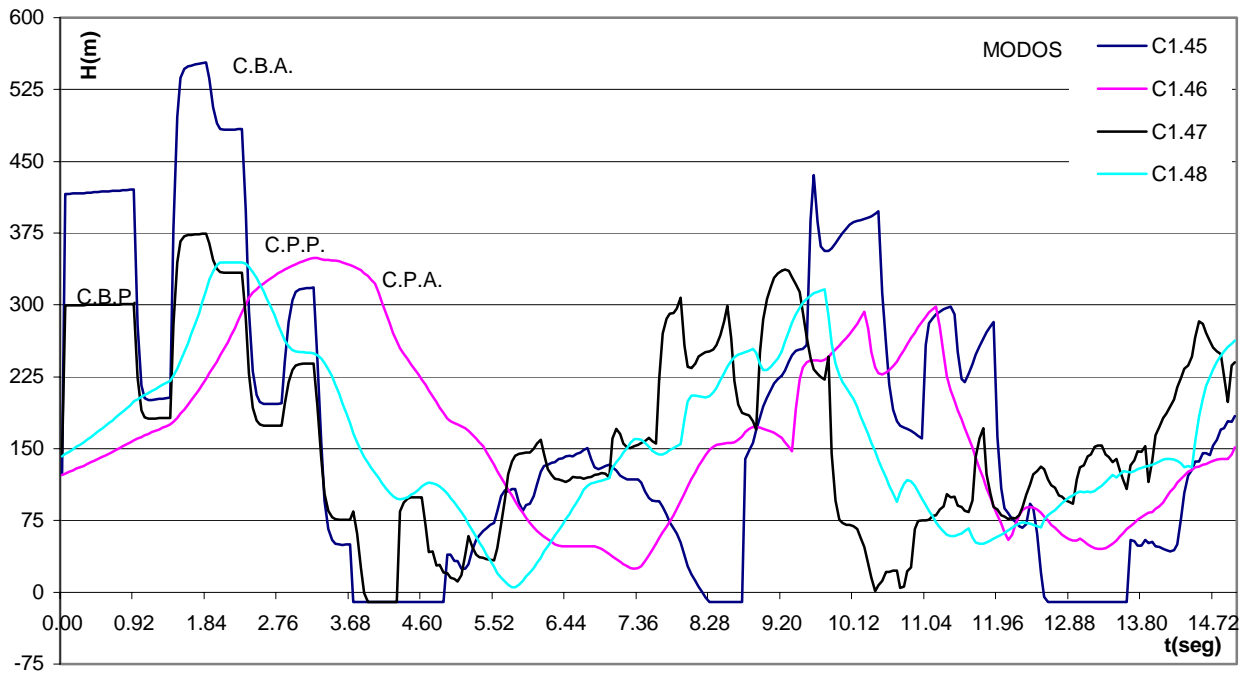
**Gráfico No. IV.9.31: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula b totalmente abierta)**



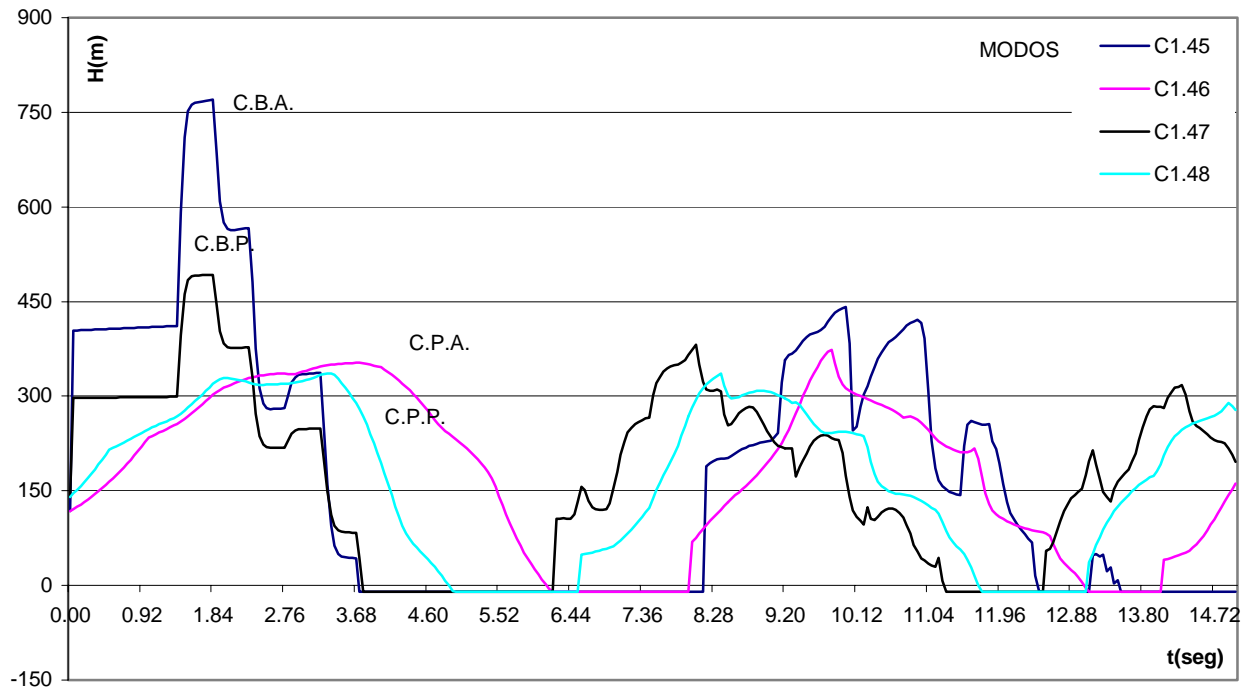
**Gráfico No. IV.9.32: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula b totalmente abierta)**



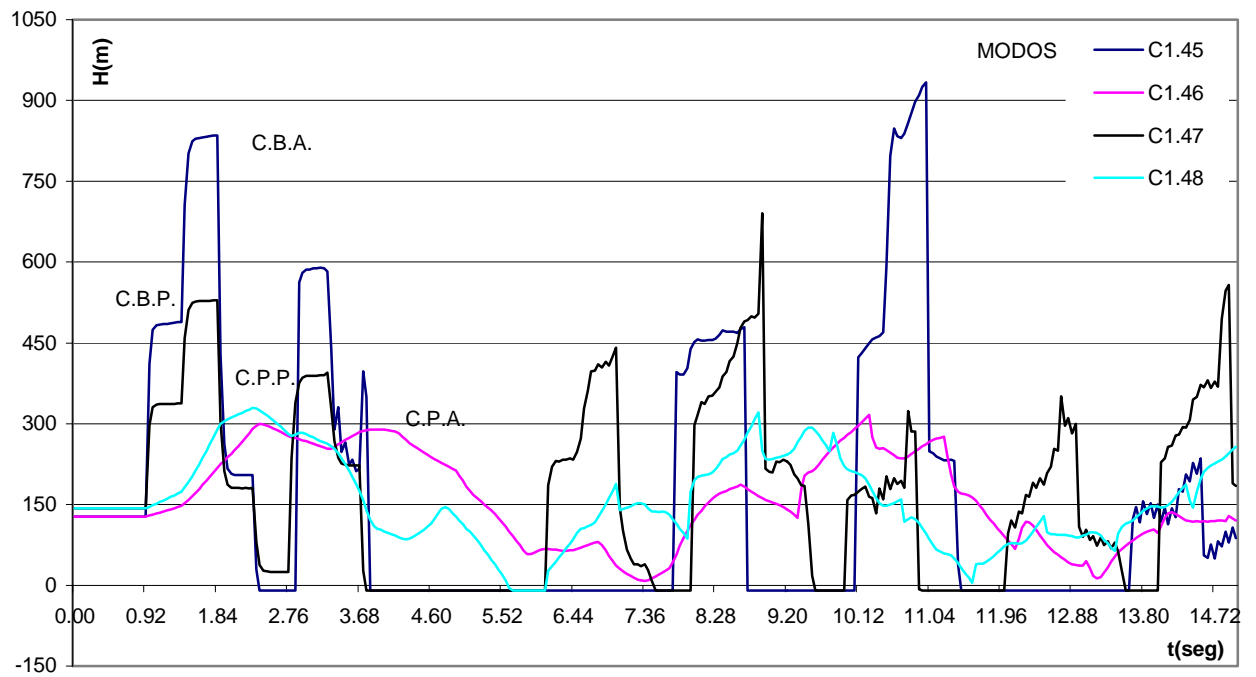
**Gráfico No. IV.9.33: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvula b totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.9.34: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a.
(Válvula c totalmente cerrada)**



**Gráfico No. IV.9.35: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b.
(Válvula c totalmente cerrada)**



**Gráfico No. IV.9.36: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvula c totalmente cerrada)**

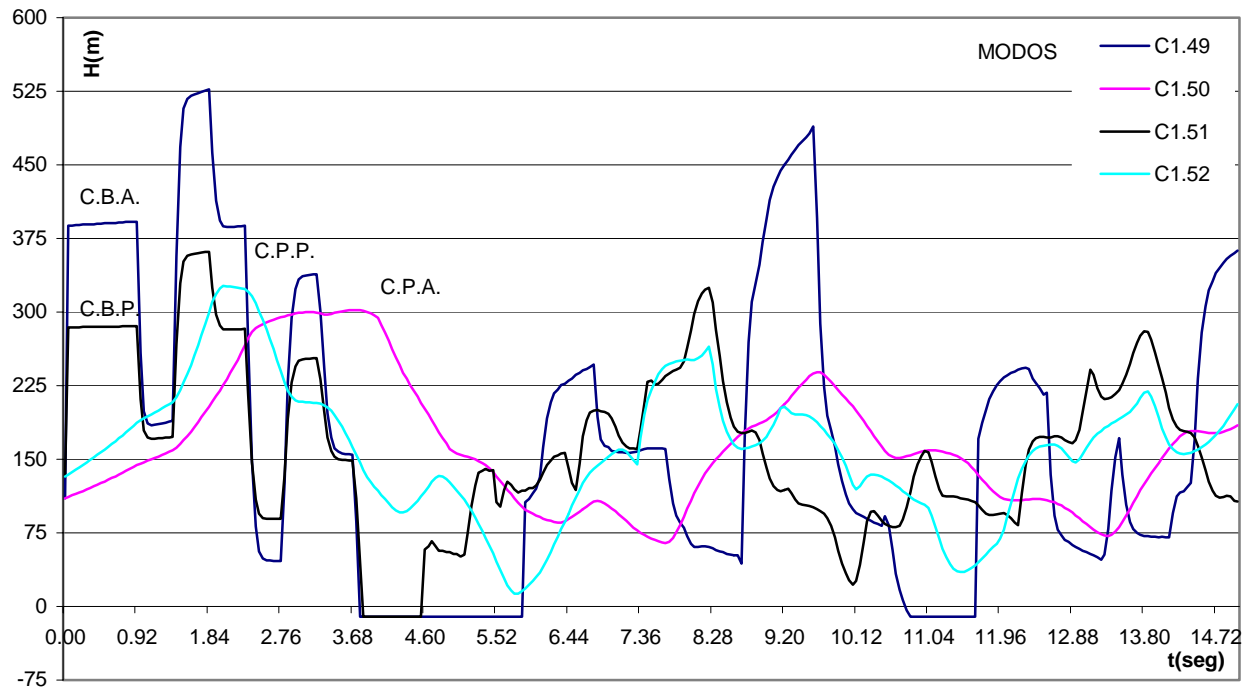


Gráfico No. IV.9.37: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula a. (Válvula c totalmente abierta)

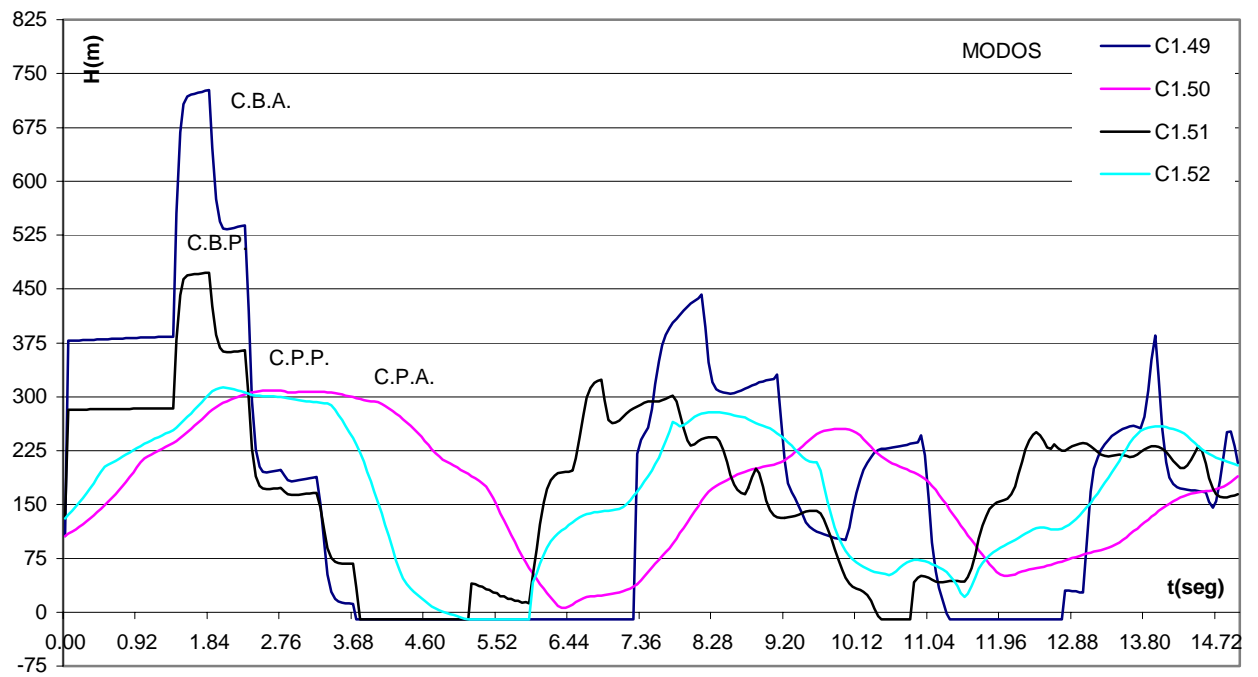
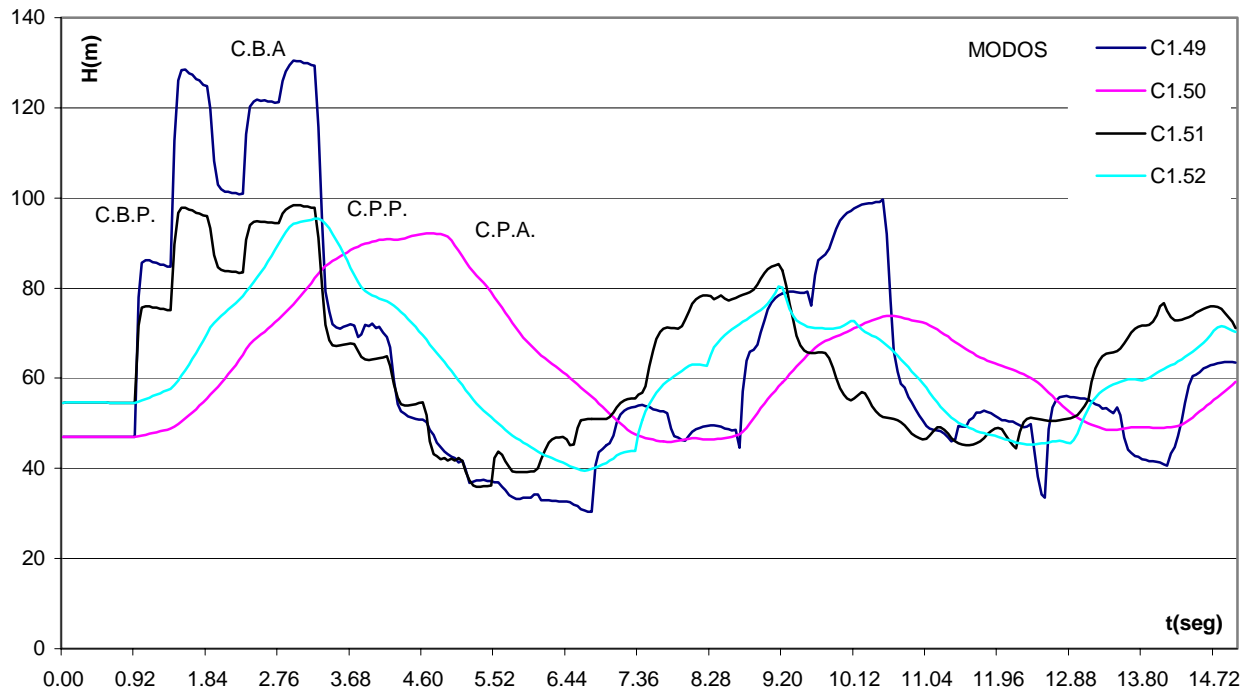
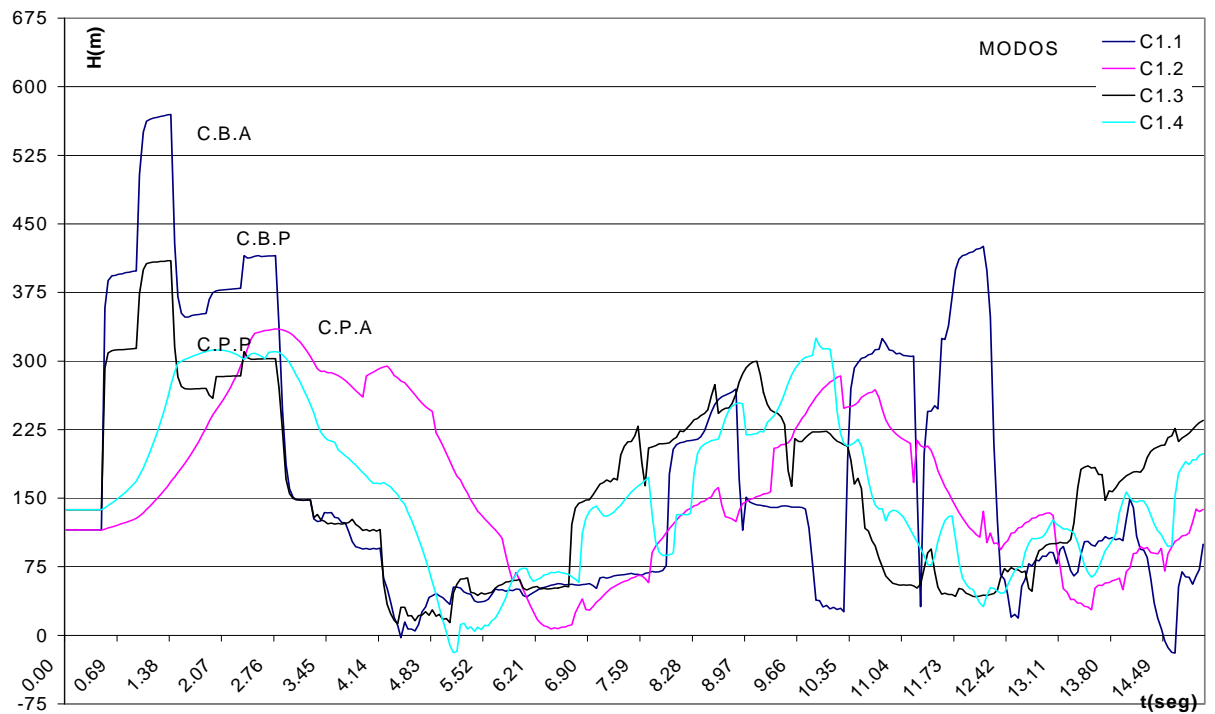


Gráfico No. IV.9.38: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula b. (Válvula c totalmente abierta)



**Gráfico No. IV.9.39: Esquema C.1: Variación de presión en la válvula c.
(Válvula c totalmente abierta)**



**Gráfico No. IV.9.40: Esquema C.1: Variación de presión en el nodo de bifurcación.
(Todas las válvulas operando)**

IV.9.3 Análisis de resultados caso C.1

Comencemos con las tres primeras gráficas No. IV.9.1, IV.9.2 y IV.9.3; que representan la variación de presión en las válvulas *a*, *b*, y *c* respectivamente, cuando todas las válvulas operan al mismo tiempo. En el primer intervalo de tiempo en las tres gráficas se puede distinguir el primer escalón de sobrepresión producido por el cierre de cada una de las válvulas y en donde todavía no se ve afectada por el resto del sistema ya que las ondas de presión comienzan a viajar aguas arriba. A partir de este momento en que las ondas de presión comienzan a llegar al nodo de unión, se observa como empiezan a afectarse cada una de ellas. Podemos destacar en las gráficas No. IV.9.1 y IV.9.2 un segundo incremento en la presión en las válvulas, efecto que no ocurre en la válvula *c* (gráfica No. IV.9.3). La explicación de esto se debe a la velocidad de onda mayor que posee el ramal de la válvula *c*, afectando primero a las válvulas *a* y *b*.

A medida que avanza el proceso comienzan a generarse más ondas de presión debido a la transmisión y reflexión de ondas de presión que ocurre en el nodo de unión, ocasionando muchos picos de presión en cada una de las válvulas y en algunos casos sumándose y/o restándose estas ondas de presión. Este efecto se observa claramente en la gráfica No. IV.9.3 para el tiempo $t = 11.91$ seg donde la presión alcanza para el modo C1.1 una altura de 965.19 m. Desde un punto de vista comparativo podemos ver en la tabla IV.9.3 como las sobrepresiones máximas generadas en las gráficas No. IV.9.1, IV.9.2 y IV.9.3 están muy por encima a las calculadas por la fórmula de Joukowsky, demostrando la importancia de la transmisión y reflexión de las ondas en los sistemas de tuberías ramificadas.

Continuaremos con el análisis de las gráficas No. IV.9.4, IV.9.5 y IV.9.6, que representan la variación de presión en cada válvula cuando las válvulas *b* y *c* están totalmente cerradas.

En la gráfica No. IV.9.4 en el primer intervalo de tiempo se observa la primera perturbación originada por el cierre de la válvula *a*, en cambio en la gráficas No. IV.9.5 y IV.9.6 para el primer intervalo de tiempo no se observa ninguna perturbación lo cual representa el intervalo de tiempo que tarda la perturbación originada en la válvula *a* para llegar a las válvulas *b* y *c*. Luego de este primer intervalo de tiempo aparecen en las válvulas *b* y *c* (gráficos No. IV.9.5 y IV.9.6 respectivamente), la primera perturbación transmitida en el nodo de unión hacia cada uno de los ramales, seguidamente comienza a alternarse picos de sobrepresión y depresión originadas nuevamente por la suma y/o resta de las ondas de presión reflejadas y transmitidas.

Ahora observando las gráficas No. IV.9.10, IV.9.11 y IV.9.12 (válvulas *a* y *c* totalmente cerradas) y las gráficas No. IV.9.16, IV.9.17 y IV.9.18 (válvulas *a* y *b* totalmente cerradas) se puede decir que el comportamiento en términos generales es parecido para los tres grupos de gráficas. De hecho en las nueve gráficas se observa sobrepresiones menores a las obtenidas en las gráficas No. IV.9.1, IV.9.2 y IV.9.3; siendo un comportamiento lógico debido al mayor número de ondas de presión producidas y por lo tanto tener mayor probabilidad de que se sumen y/o resten entre ellas.

Para este caso también se pudiera comparar la gráfica No. IV.9.4 con la gráfica No. IV.3.3, se observa de nuevo sobrepresiones iguales al principio pero menores en el resto de la gráfica No. IV.9.4.

Existe un resultado muy importante que cabe destacar con respecto a la operación del sistema. Si se evalúa al ramal activo con la formula de Joukowsky (ver tabla No. IV.9.3) pensaríamos que el sistema no sobrepasaría esa sobrepresión, siendo realidad en este caso para el ramal activo, pero basta observar las gráficas de los ramales inactivos y darnos cuenta de la aparición de sobrepresiones muy por encima de la sobrepresión evaluada por

Joukowsky; cuantificando de esta manera la importancia de los ramales inactivos. Reiteradamente existe un resultado que pone en evidencia la importancia de los ramales inactivos y es al comparar la gráfica No. IV.9.3 (todas las válvulas operando) con la gráfica No. IV.9.18 (válvulas *a* y *b* totalmente cerradas) se observa que la mayor sobrepresión registrada en el gráfico C1.18 es mayor a cualquiera de las sobrepresiones del gráfico No. IV.9.3 en la válvula *c*.

Otro resultado importante que se puede ver en las gráficas No. IV.9.16, IV.9.17 y IV.9.18 se refiere al coeficiente de transmisión en los ramales de las válvulas *a* y *b*, observando las gráficas No. IV.9.16 y IV.9.18 verificamos la igualdad en magnitud de la sobrepresión en el primer intervalo de tiempo, debido a que las características de geometría (diámetro) y velocidad de onda son iguales para ambos ramales.

En este grupo de gráficas se puede observar la influencia de la ley de cierre de la válvula lográndose atenuaciones mayores para tiempo de cierre mayores. Específicamente si se observa el primer intervalo de tiempo de las gráficas No. IV.6.3 y IV.9.4 se ve que para un mismo ramal de iguales parámetros geométricos y diferentes tiempos de cierre, las sobrepresiones generadas en el modo de tiempo de cierre mayor son menores.

A continuación analizaremos los modos de operación cuando dos de las válvulas se encuentran totalmente abiertas. Las gráficas correspondientes son las siguientes:

- IV.9.7, IV.9.8 y IV.9.9 (válvulas *b* y *c* totalmente abiertas).
- IV.9.13, IV.9.14 y IV.9.15 (válvulas *a* y *c* totalmente abiertas).
- IV.9.19, IV.9.20 y IV.9.21 (válvulas *a* y *b* totalmente abiertas).

Primero, de manera general se observa en las gráficas una rápida atenuación de las sobrepresiones originadas en el ramal de operación, a pesar de esto en algunos casos sigue existiendo separación de columna líquida en el ramal de la válvula cerrada. Ahora comparando los tres casos se tiene, cuando la válvula *a* opera la atenuación ocurre con mayor rapidez, originado por un período de oscilación menor con respecto a cuando cierra la válvula *b* y también por sobrepresiones menores con respecto a la válvula *c*.

Para las gráficas No. IV.9.7, IV.9.14 y IV.9.21 que representan la variación de presión de la válvula operando (válvula *a*, *b* y *c* respectivamente) en cada caso se observa de nuevo para el primer intervalo de tiempo la sobrepresión original creada por el cierre de esa válvula, en estos tres gráficos vemos la diferencia en duración de esta sobrepresión original debido a los períodos de oscilación y también se ve la diferencia en magnitud de la sobrepresión original en la gráfica No. IV.9.21 con respecto a las otras dos debido a los parámetros geométricos y la velocidad de onda mayor. Con respecto al resto de las gráficas (IV.9.8, IV.9.9, IV.9.13, IV.9.15, IV.9.19 y IV.9.20) se verifica nuevamente en el primer intervalo de tiempo la ausencia de sobrepresiones.

Para finalizar se puede observar en todas las gráficas como tienden a estabilizarse a su estado estacionario.

Ahora analizaremos los modos de operación cuando una de las válvulas se encuentra totalmente cerrada. Las gráficas correspondientes son las siguientes:

- IV.9.22, IV.9.23 y IV.9.24 (válvula *a* totalmente cerrada).
- IV.9.28, IV.9.29 y IV.9.30 (válvula *b* totalmente cerrada).
- IV.9.34, IV.9.35 y IV.9.36 (válvula *c* totalmente cerrada).

Observamos en este grupo de gráficos que las sobrepresiones en general son menores a las generadas en los gráficos No. IV.9.1, IV.9.2 y IV.9.3, pero en la gráfica No. IV.9.24 se

observa que aparecen sobrepresiones mayores que en cualquier otra gráfica para los 52 modos de operación; más aun si comparamos esta gráfica con la gráfica No. IV.9.3 observamos que también las sobrepresiones son mayores, nuevamente resalta la influencia de los ramales inactivos, ya que pudiéramos pensar que los modos de operación más críticos serían cuando todas las válvulas operan al mismo tiempo y sin embargo aquí se ve que debido a la suma, resta, reflexión y transmisión de las ondas de presión alcanzamos presiones mayores en el sistema.

Analizando las nueve gráficas podemos en resumen decir que el comportamiento de las sobrepresiones difiere muy poco entre ellas, pudiendo tener sus máximos valores en los primeros intervalos de tiempo y luego comportándose de una manera desordenada con picos de sobrepresiones y depresiones o pudiendo tener sus máximos valores mucho después del primer intervalo de tiempo como en las gráficas: No. IV.9.24, IV.9.28, IV.9.34 y IV.9.36, ocasionado por la reflexión y transmisión de ondas de presión en el nodo de unión.

Para terminar con el caso C.1 analizaremos el grupo de gráficos que representan el modo de operación con una sola válvula abierta. Dichos gráficos son los siguientes:

- IV.9.25, IV.9.26 y IV.9.27 (válvula *a* totalmente abierta).
- IV.9.31, IV.9.32 y IV.9.33 (válvula *b* totalmente abierta).
- IV.9.37, IV.9.38 y IV.9.39 (válvula *c* totalmente abierta).

El comportamiento general de este grupo de gráficos es la atenuación de las sobrepresiones, por supuesto la atenuación es considerablemente más lenta que en los casos con dos válvulas abiertas ya que la cantidad de energía de presión transformada en energía cinética es menor.

Estudiando estas nuevas gráficas se observa que las atenuaciones mayores ocurren cuando el ramal de la válvula *a* esta abierta y las menores atenuaciones cuando el ramal de la válvula *c* esta abierta. Uno de los factores que origina este comportamiento tiene que ver con la resistencia de la tubería. El ramal de la válvula *a* es más corto en longitud que el ramal de la válvula *b* y el ramal de la válvula *c* es de menor diámetro que el ramal de la válvula *a*.

En los gráficos No. IV.9.26, IV.9.27, IV.9.31, IV.9.33, IV.9.37 y IV.9.38, a pesar de la atenuación también se observa el fenómeno de separación de la columna líquida y en este caso con mayor ocurrencia para cuando solo esta abierta una válvula.

De acuerdo a la presión máxima de trabajo (norma B16.5) los siguientes modos NO fallarían: C1.6, C1.8, C1.9, C1.10, C1.11, C1.12, C1.13, C1.14, C1.15, C1.16, C1.17, C1.18, C1.19, C1.20, C1.46, C1.48, C1.50, C1.51, C1.52.

Para estudiar los casos C.2 y C.3 seleccionaremos el modo C1.1 ya que en promedio posee las mayores sobrepresiones registradas.

Tabla No. IV.9.3: Caso C.1 Alturas máximas obtenidas en las válvulas.

Modos	H _m máx(m)	H _j ou(m)	H _b máx(m)	H _b jou(m)	H _c máx(m)	H _c jou(m)
C1.1	745.47	387.59	937.65	377.18	965.19	787.75
C1.2	463.78	387.59	501.16	377.18	765.31	787.75
C1.3	527.70	289.75	637.07	287.39	740.10	643.08
C1.4	481.93	289.75	461.50	287.39	650.23	643.08
C1.5	453.22	447.09	525.00	0.00	687.90	0.00
C1.6	279.96	447.09	276.06	0.00	241.33	0.00
C1.7	319.56	306.52	359.75	0.00	549.57	0.00
C1.8	253.24	306.52	278.40	0.00	229.00	0.00
C1.9	392.18	387.59	273.88	377.18	86.12	787.75
C1.10	212.68	387.59	156.49	377.18	66.31	787.75
C1.11	271.72	270.53	200.34	397.45	71.19	822.57

C1.12	221.77	270.53	160.58	397.45	65.75	822.57
C1.13	516.15	0.00	478.31	435.35	514.52	0.00
C1.14	286.62	0.00	331.17	435.35	284.61	0.00
C1.15	343.84	0.00	333.55	304.04	365.35	0.00
C1.16	274.02	0.00	299.14	304.04	277.44	0.00
C1.17	278.44	387.59	385.84	377.18	84.90	787.75
C1.18	169.85	387.59	270.73	377.18	66.01	787.75
C1.19	206.63	407.75	270.02	267.79	70.73	821.33
C1.20	173.24	407.75	262.54	267.79	67.17	821.33
C1.21	393.62	0.00	430.94	0.00	983.79	897.11
C1.22	326.42	0.00	356.35	0.00	745.57	897.11
C1.23	361.57	0.00	417.88	0.00	712.76	673.31
C1.24	305.89	0.00	308.90	0.00	669.75	673.31
C1.25	216.71	387.59	208.79	377.18	855.54	787.75
C1.26	193.16	387.59	183.77	377.18	656.10	787.75
C1.27	186.20	396.90	179.18	386.21	625.23	593.78
C1.28	181.46	396.90	174.24	386.21	589.44	593.78
C1.29	729.41	0.00	658.48	416.37	1049.73	854.63
C1.30	434.80	0.00	495.93	416.37	781.50	854.63
C1.31	502.32	0.00	463.93	298.07	827.20	661.83
C1.32	393.66	0.00	401.10	298.07	660.88	661.83
C1.33	399.01	387.59	602.94	377.18	855.54	787.75
C1.34	267.25	387.59	398.40	377.18	719.89	787.75
C1.35	294.22	416.39	432.22	274.18	653.73	619.66
C1.36	239.99	416.39	371.09	274.18	615.57	619.66
C1.37	498.60	427.26	738.69	0.00	932.38	853.41
C1.38	386.54	427.26	413.07	0.00	758.68	853.41
C1.39	384.36	300.48	503.81	0.00	708.33	661.75
C1.40	402.04	300.48	378.73	0.00	663.01	661.75
C1.41	429.20	387.59	392.87	377.18	855.54	787.75
C1.42	349.90	387.59	230.00	377.18	701.79	787.75
C1.43	330.78	276.96	285.94	405.79	654.61	620.60
C1.44	375.87	276.96	223.62	405.79	621.10	620.60
C1.45	553.20	414.99	770.29	403.74	934.01	0.00
C1.46	348.96	414.99	373.88	403.74	316.68	0.00
C1.47	374.22	299.26	492.63	296.81	690.69	0.00
C1.48	344.48	299.26	336.19	296.81	328.96	0.00
C1.49	526.73	387.59	727.05	377.18	130.47	787.75
C1.50	302.22	387.59	308.90	377.18	92.18	787.75
C1.51	361.62	284.21	472.41	281.90	98.44	852.61
C1.52	326.74	284.21	312.79	281.90	95.37	852.61

IV.10 CASO C.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO

IV.10.1 Parámetros y características operacionales del caso C.2.

De acuerdo al esquema C.2 en cada uno de los extremos de cada ramal se colocó una válvula de alivio seteada a la presión admisible ($H_{set} = 521.24$ m) y también estudiaremos tres modos de operación (10% Q_0 , 40% Q_0 y 100% Q_0).

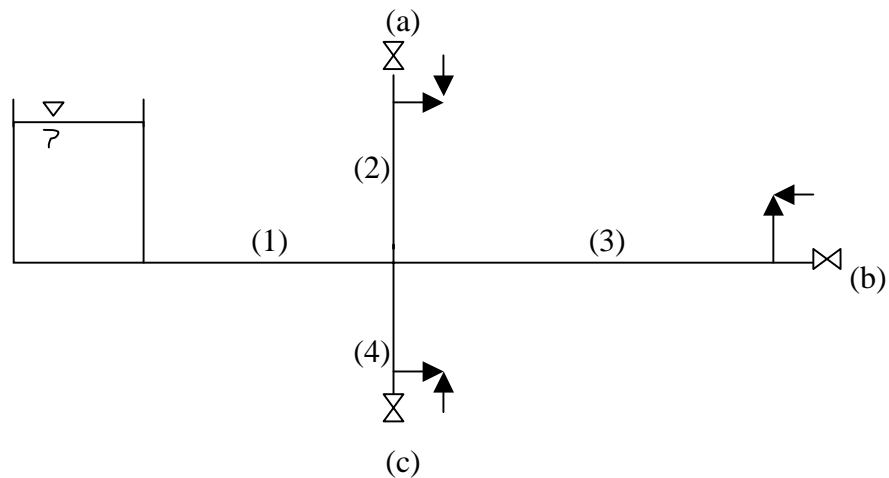


Figura No. IV.10.1: Esquema C.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

$L_1 = 600$ m
 $D_1 = 0.5$ m

$L_2 = 600$ m
 $D_2 = 0.5$ m

$L_3 = 1200$ m
 $D_3 = 0.5$ m

$L_4 = 600$ m
 $D_4 = 0.25$ m

Tabla No. IV.10.1: Caso C.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio.

Modos	Válvula a	Válvula b	Válvula c	Q_{ades} (m^3/s)	H_{set} (m)	Q_{bdes} (m^3/s)	H_{bset} (m)	Q_{cdes} (m^3/s)	H_{cset} (m)
C2.1	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.04186	521.24	0.04098	521.24	0.02734	521.24
C2.2	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.16744	521.24	0.16392	521.24	0.10936	521.24
C2.3	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.41860	521.24	0.40980	521.24	0.27340	521.24

Tabla No. IV.10.2: Caso C.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q_{02} (m^3/s)	Q_{03} (m^3/s)	Q_{04} (m^3/s)
C2.1	0.4186	0.4098	0.2734
C2.2	0.4186	0.4098	0.2734
C2.3	0.4186	0.4098	0.2734

IV.10.2 Resultados obtenidos en el caso C.2

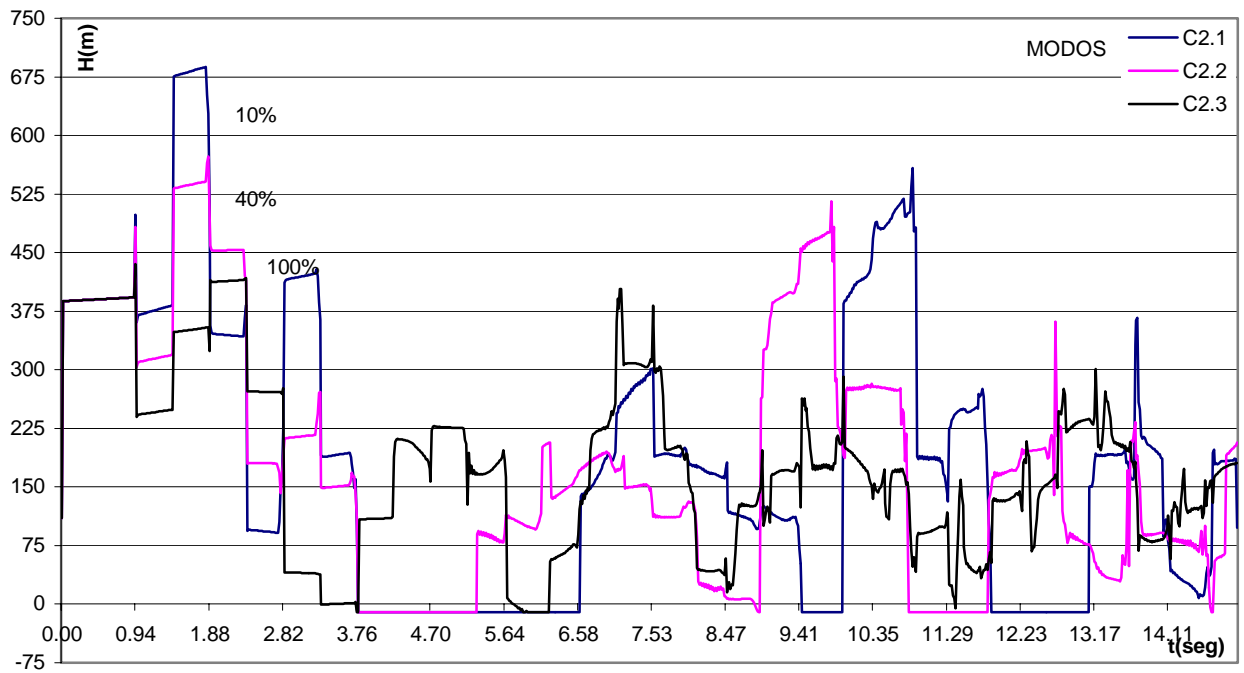


Gráfico No. IV.10.1: Esquema C.2: Variación de presión en la válvula a.

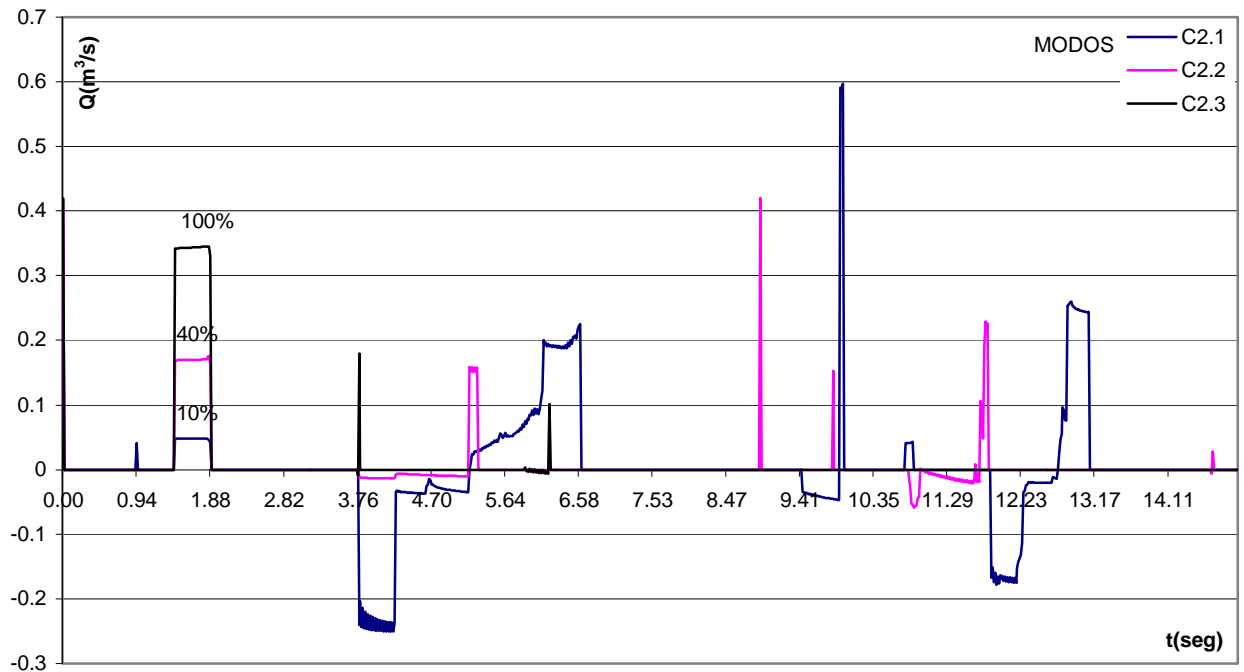


Gráfico No. IV.10.2: Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula a.

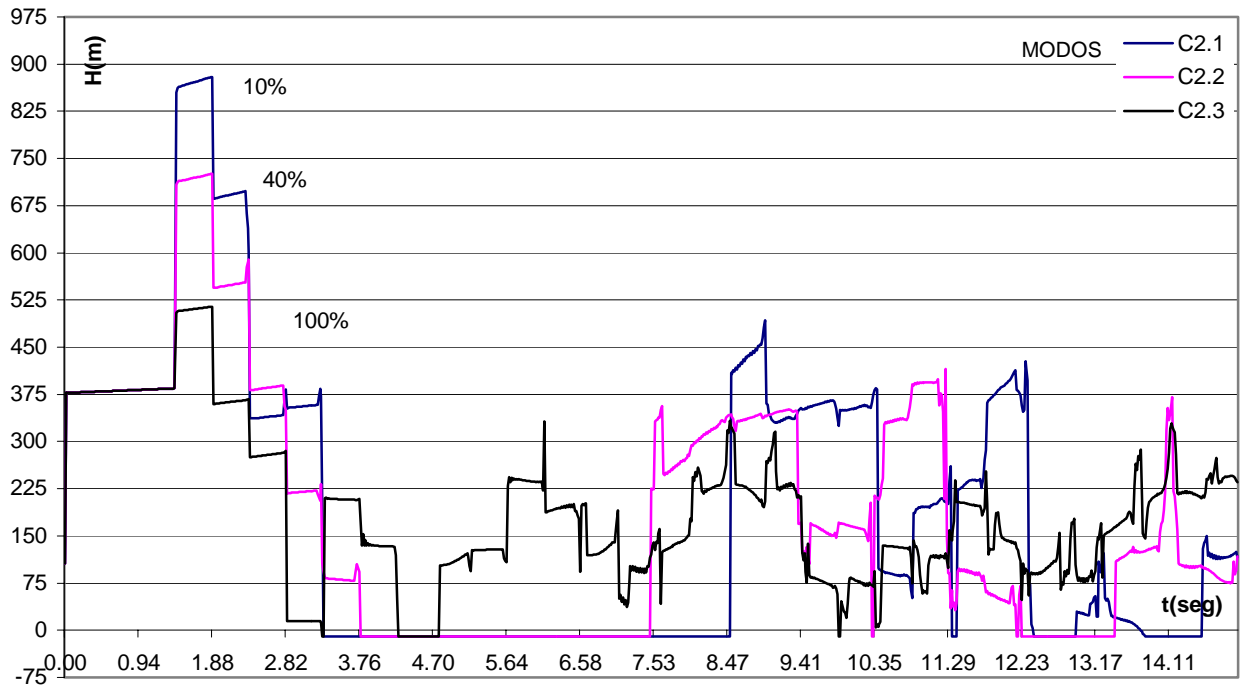


Gráfico IV.10.3: Esquema C.2: Variación de presión en la válvula b.

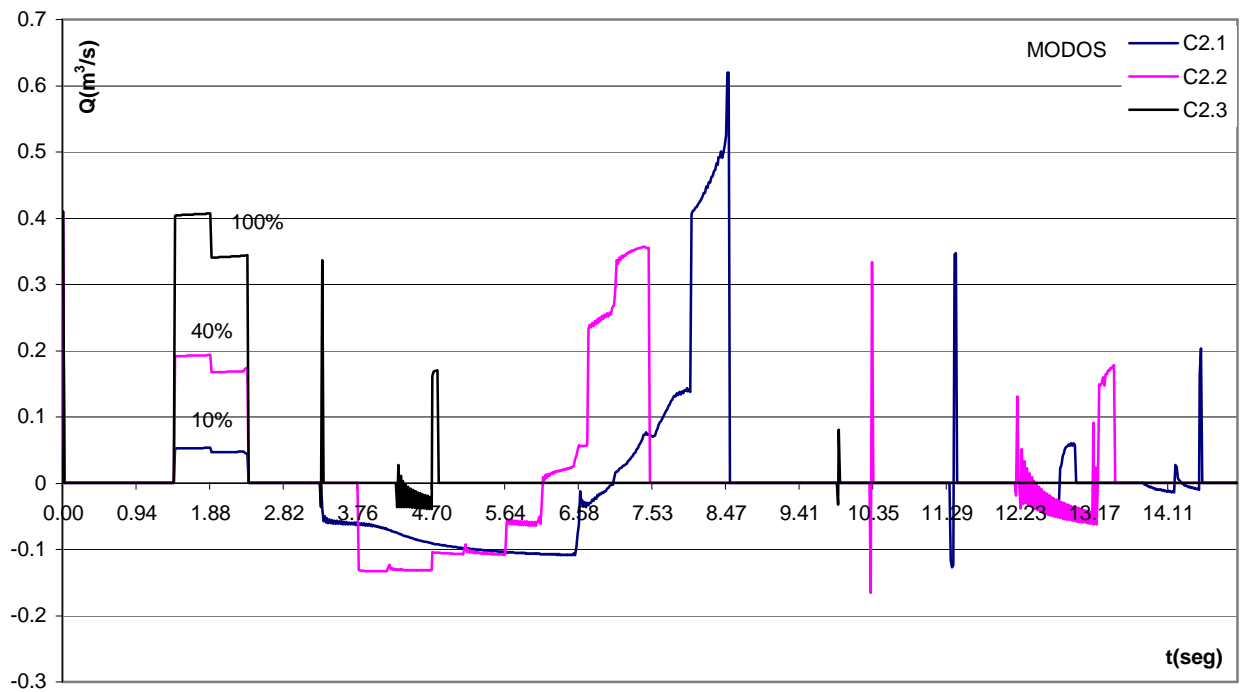


Gráfico IV.10.4: Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula b.

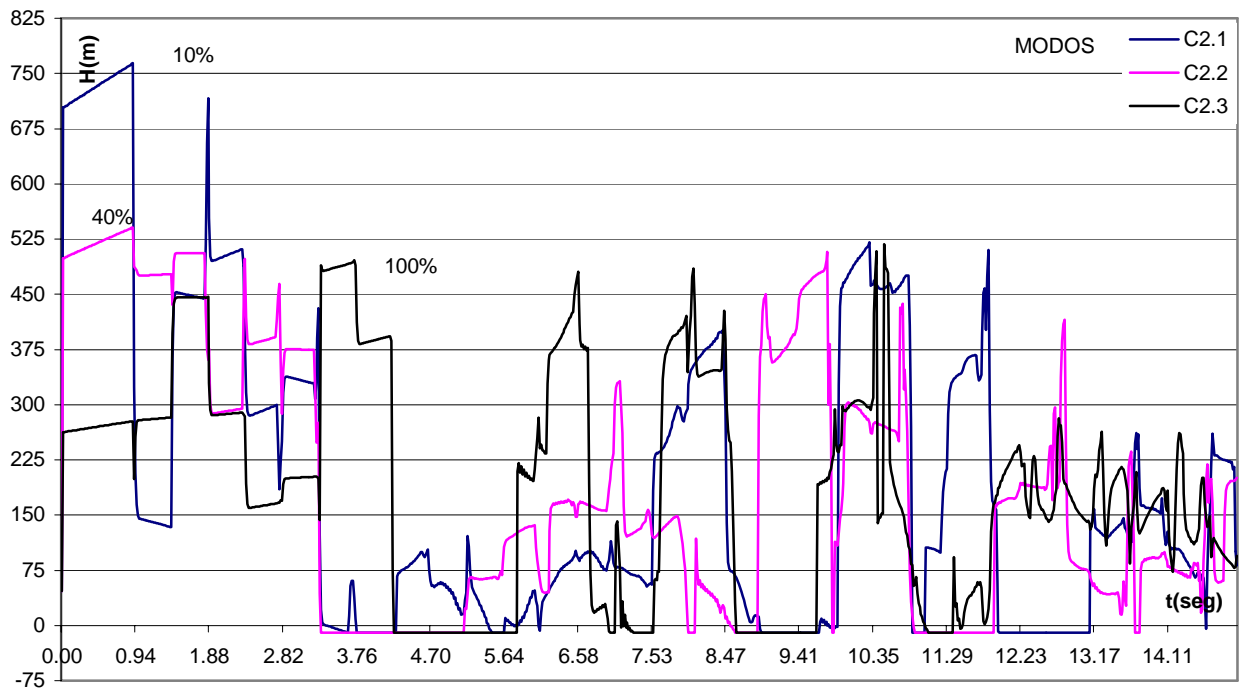


Gráfico IV.10.5: Esquema C.2: Variación de presión en la válvula c.

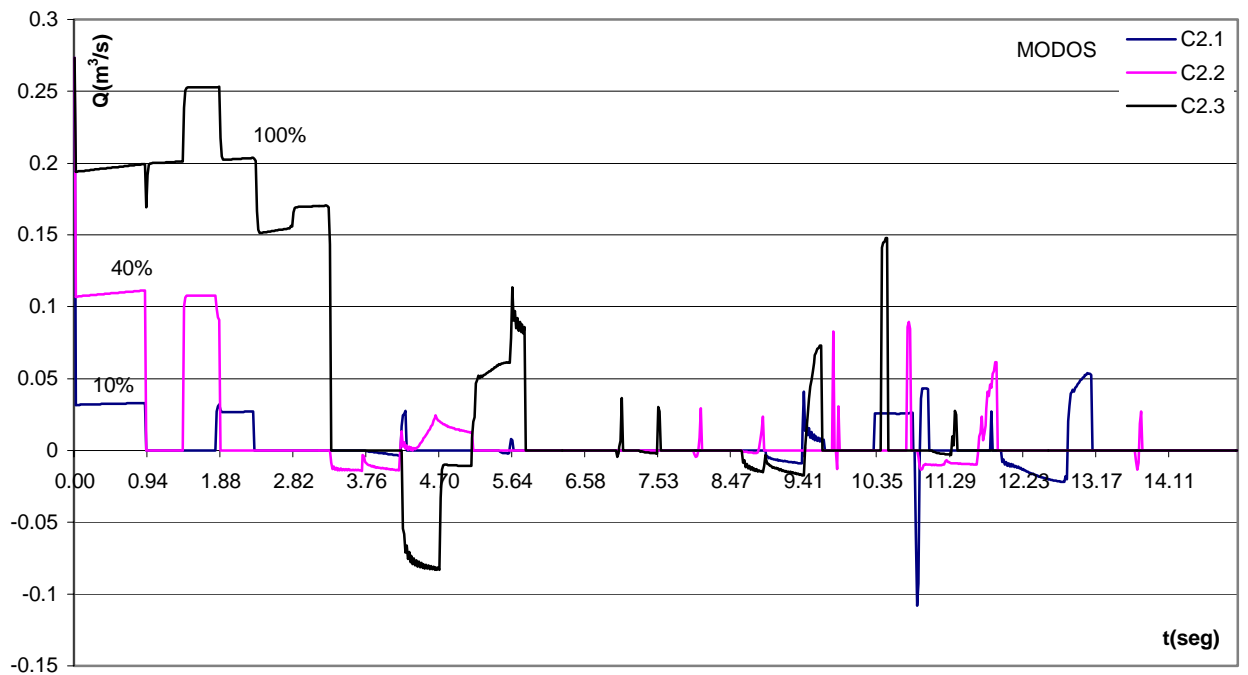


Gráfico IV.10.6: Esquema C.2: Variación de caudal en la válvula c.

IV.10.3 Análisis de resultados caso C.2

Comenzando con un caudal de desalojo del 10% de Q_0 , se observa en las gráficas No. IV.10.1, IV.10.3 y IV.10.5 que el caudal desalojado no es suficiente como para liberar la sobrepresión en cualquiera de las tres válvulas, alcanzando presiones muy por encima de la presión de seteo. De hecho analizando la gráfica No. IV.10.2, se observa que la válvula de alivio se abre en dos oportunidades, en la gráfica No. IV.10.4 en una sola oportunidad y en la gráfica No. IV.10.6 en cuatro oportunidades.

Luego para un caudal de desalojo del 40% de Q_0 todavía no es suficiente el diámetro del orificio de la válvula de alivio para liberar la sobrepresión necesaria, de hecho en los tres ramales se alcanzan sobrepresiones por encima de la presión de seteo. Bajo esta condición la válvula de alivio *a* se abre en dos oportunidades, la válvula de alivio *b* en una sola oportunidad y la válvula de alivio *c* en cuatro oportunidades.

Finalmente para un caudal de desalojo del 100% de Q_0 , logramos que nuestro sistema mantenga su presión por debajo de la presión de seteo. Ahora analizando las gráficas del caudal para este modo, observamos que el ramal de la válvula *c* es el ramal más crítico y fue necesario que la válvula se mantuviera abierta por más tiempo y en dos oportunidades.

Para el modo C2.3 se logro atenuar en un 56% la sobrepresión de la válvula *a*, un 55% la sobrepresión de la válvula *b* y en un 53% la sobrepresión de la válvula *c* con respecto al modo C1.1.

Nuevamente en las gráficas de caudal (No. IV.10.2, IV.10.4 y IV.10.6) se observa la formación y colapso de la cavidad de vapor en las válvulas, al registrarse caudales negativos y luego de estos caudales positivos.

IV.11 CASO C.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-BASS

IV.11.1 Parámetros y características operacionales del caso C.3.

De acuerdo al esquema C.3 se colocó el by-pass antes del nodo de bifurcación de los tres ramales, se estudiara la influencia del by-pass con dos longitudes diferentes.

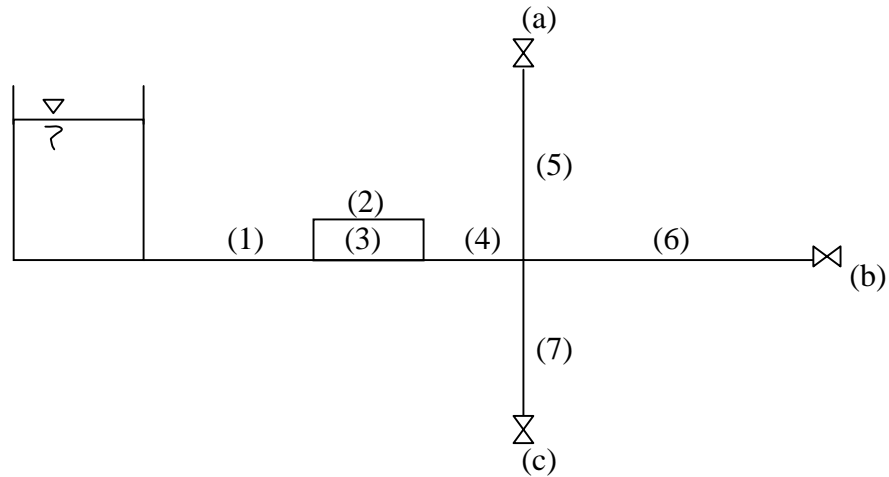


Figura No. IV.11.1: Esquema C.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 557 m L3 = 22m L4 = 21m L5 = 600 m L6 = 1200 m L7 = 600 m
D1= 0.5 m D3 = 0.5 D4 = 0.5 D5 = 0.5 m D6 = 0.5 m D7 = 0.25 m

Tabla No. IV.11.1: Caso C.3 Modos de operación, longitud del by-pass.

Modos	Válvula a	Válvula b	Válvula c	L2 (m)	D2 (m)
C3.1	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	113	0.5
C3.2	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	31	0.5

Tabla No. IV.11.2: Caso C.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	Q03 (m ³ /s)	Q04 (m ³ /s)	Q05 (m ³ /s)	Q06 (m ³ /s)	Q07 (m ³ /s)
C3.1	1.1026	0.3376	0.7650	1.1026	0.4189	0.4101	0.2735
C3.2	1.1038	0.5047	0.5991	1.1038	0.4194	0.4106	0.2738

IV.11.2 Resultados obtenidos en el caso C.3

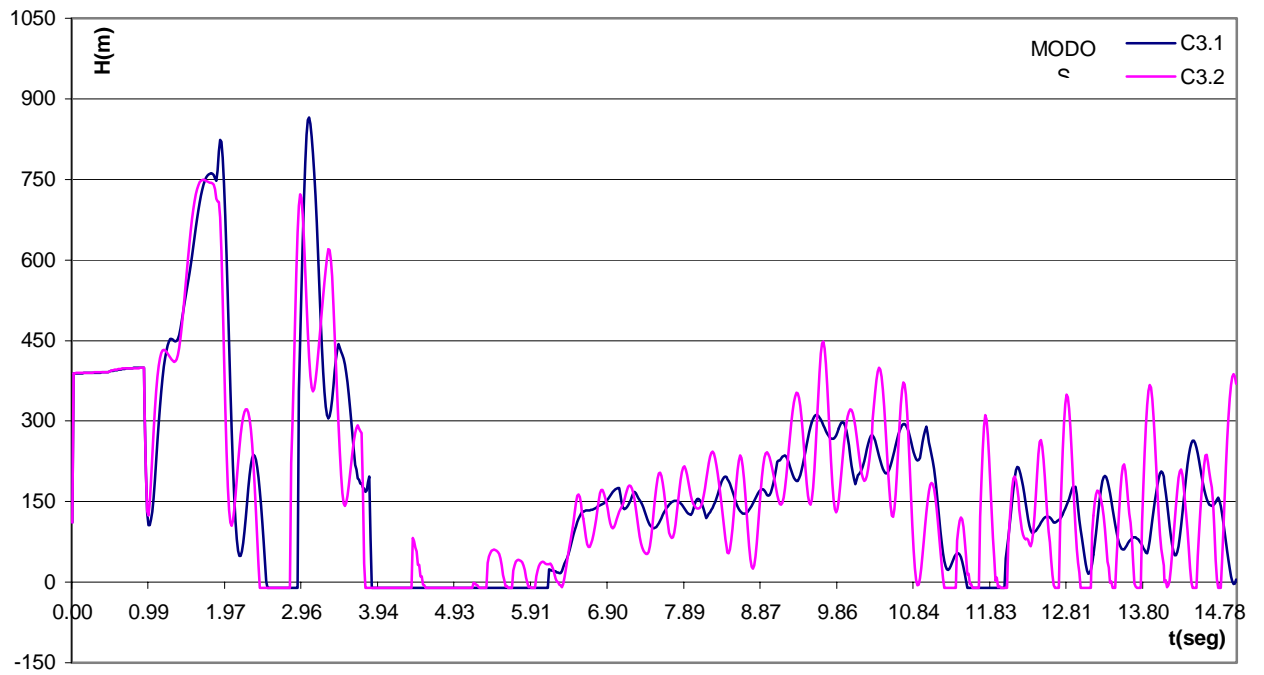


Gráfico No. IV.11.1: Esquema C.3: Variación de presión en la válvula a.

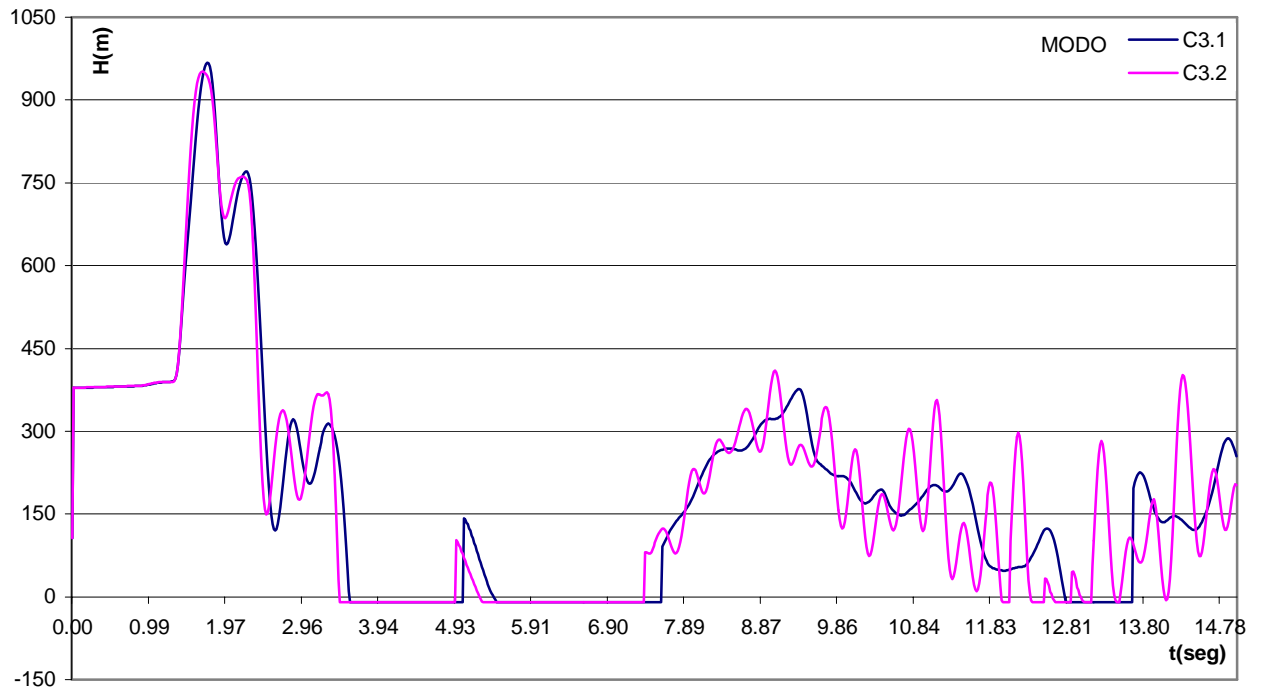


Gráfico No. IV.11.2: Esquema C.3: Variación de presión en la válvula b.

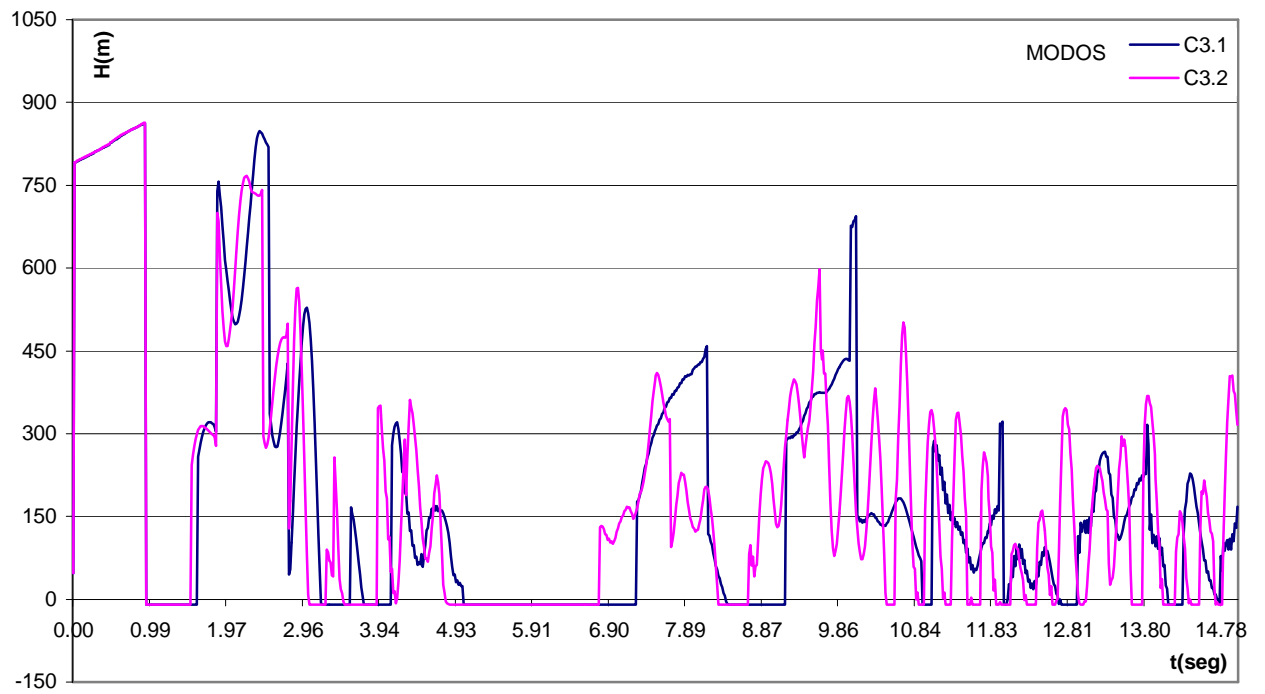


Gráfico No. IV.11.3: Esquema C.3: Variación de presión en la válvula c.

IV.11.3 Análisis de resultados caso C.3

Analizando las gráficas No. IV.11.1, IV.11.2 y IV.11.3 se observa de nuevo un comportamiento parecido entre ellas, al principio una serie de sobrepresiones altas, un poco mayores a las sobrepresiones generadas en el modo C1.1; pero luego de este primer intervalo de tiempo obtenemos una atenuación de las sobrepresiones por el orden del 60%, 68% y 66% respectivamente. Con respecto a la longitud del by-pass, en los tres gráficos se observan sobrepresiones de menor magnitud para la longitud menor (modo C3.2) así como también se observa que la variación de presión para este modo es mayor debido al tener una longitud de by-pass menor tenemos un período de oscilación menor y por lo tanto aparecerán con mayor rapidez nuevas ondas de presión. .

IV.12 CASO D.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN

IV.12.1 Parámetros y características operacionales del caso D.1.

El caso D.1 es un sistema hidráulico basado en el modo A1.5, comprendido por un tanque unido a una tubería principal y esta a su vez con dos ramales “cortos” con válvulas en sus extremos. Cada válvula posee una ley de cierre diferente y además se estudia la influencia cuando una válvula esta todo el tiempo totalmente abierta o todo el tiempo totalmente cerrada. El caso D.1 servirá como punto de comparación con respecto al caso B.1 de manera de estudiar la diferencia de longitudes de los ramales.

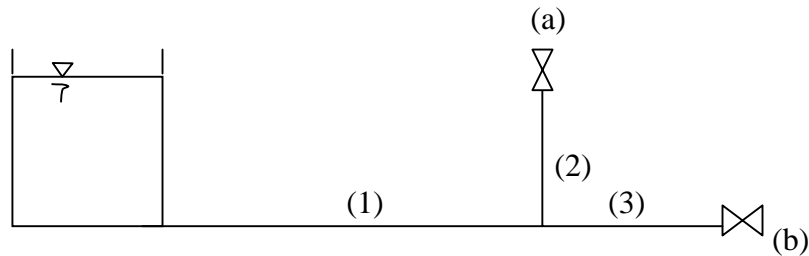


Figura No. IV.12.1 Esquema D.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas,

L1 = 1186 m.
D1 = 0.5 m.

L2 = 14 m.
D2 = 0.5 m.

L3 = 111 m.
D3 = 0.5 m.

Tabla No. IV.12.1: Caso D.1 Modos de operación (D,L de la tubería ctte)

Modos	Válvula a	tc (seg)	τ_i	Válvula b	tc (seg)	τ_i
D1.1	C.B.A	0.0	1.0	C.B.A	0.0	1.0
D1.2	C.P.A	2.0	1.0	C.P.A	4.0	1.0
D1.3	C.B.P	0.0	0.5	C.B.P	0.0	0.5
D1.4	C.P.P	1.0	0.5	C.P.P	2.0	0.5
D1.5	C.B.A	0.0	1.0	T.C	T.C	0.0
D1.6	C.P.A	2.0	1.0	T.C	T.C	0.0
D1.7	C.B.P	0.0	0.5	T.C	T.C	0.0
D1.8	C.P.P	1.0	0.5	T.C	T.C	0.0

D1.9	C.B.A	0.0	1.0	T.A	T.A	1.0
D1.10	C.P.A	2.0	1.0	T.A	T.A	1.0
D1.11	C.B.P	0.0	0.5	T.A	T.A	1.0
D1.12	C.P.P	1.0	0.5	T.A	T.A	1.0
D1.13	T.C	T.C	0.0	C.B.A	0.0	1.0
D1.14	T.C	T.C	0.0	C.P.A	4.0	1.0
D1.15	T.C	T.C	0.0	C.B.P	0.0	0.5
D1.16	T.C	T.C	0.0	C.P.P	2.0	0.5
D1.17	T.A	T.A	1.0	C.B.A	0.0	1.0
D1.18	T.A	T.A	1.0	C.P.A	4.0	1.0
D1.19	T.A	T.A	1.0	C.B.P	0.0	0.5
D1.20	T.A	T.A	1.0	C.P.P	2.0	0.5

Tabla No. IV.12.2: Caso D.1 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m³/s)	Q02 (m³/s)	H0(a) (m)	Q03 (m³/s)	H0(b) (m)
D1.1	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.2	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.3	0.4674	0.2338	137.63	0.2336	137.38
D1.4	0.4674	0.2338	137.63	0.2336	137.38
D1.5	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00
D1.6	0.4674	0.4674	137.52	0.0000	0.00
D1.7	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00
D1.8	0.2414	0.2414	146.67	0.0000	0.00
D1.9	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.10	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.11	0.6664	0.2227	124.90	0.4436	123.89
D1.12	0.6664	0.2227	124.90	0.4436	123.89
D1.13	0.4658	0.0000	0.00	0.4658	136.60
D1.14	0.4658	0.0000	0.00	0.4658	136.60
D1.15	0.2411	0.0000	0.00	0.2411	146.41
D1.16	0.2411	0.0000	0.00	0.2411	146.41
D1.17	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.18	0.8361	0.4188	110.42	0.4173	109.61
D1.19	0.6675	0.4451	124.71	0.2224	124.58
D1.20	0.6675	0.4451	124.71	0.2224	124.58

Leyes de cierre de las válvulas:

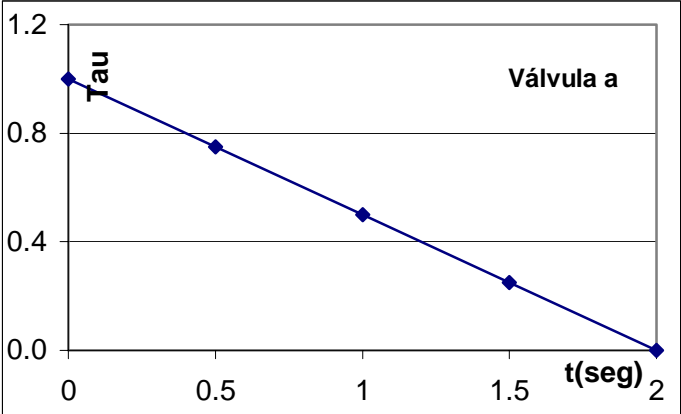


Figura No. IV.12.2 Ley de cierre de la válvula a

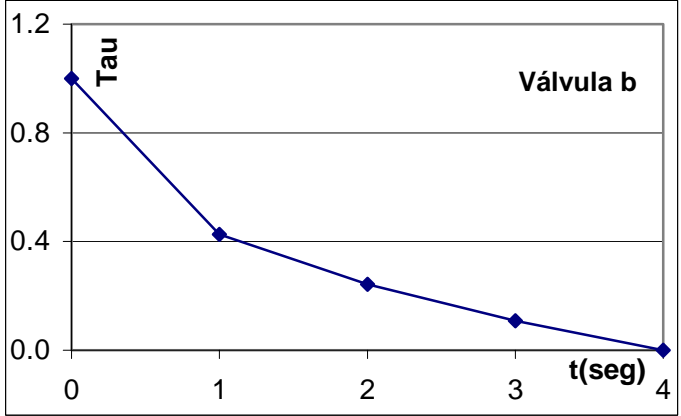


Figura No. IV.12.3 Ley de cierre de la válvula b

IV.12.2 Resultados obtenidos en el caso D.1.

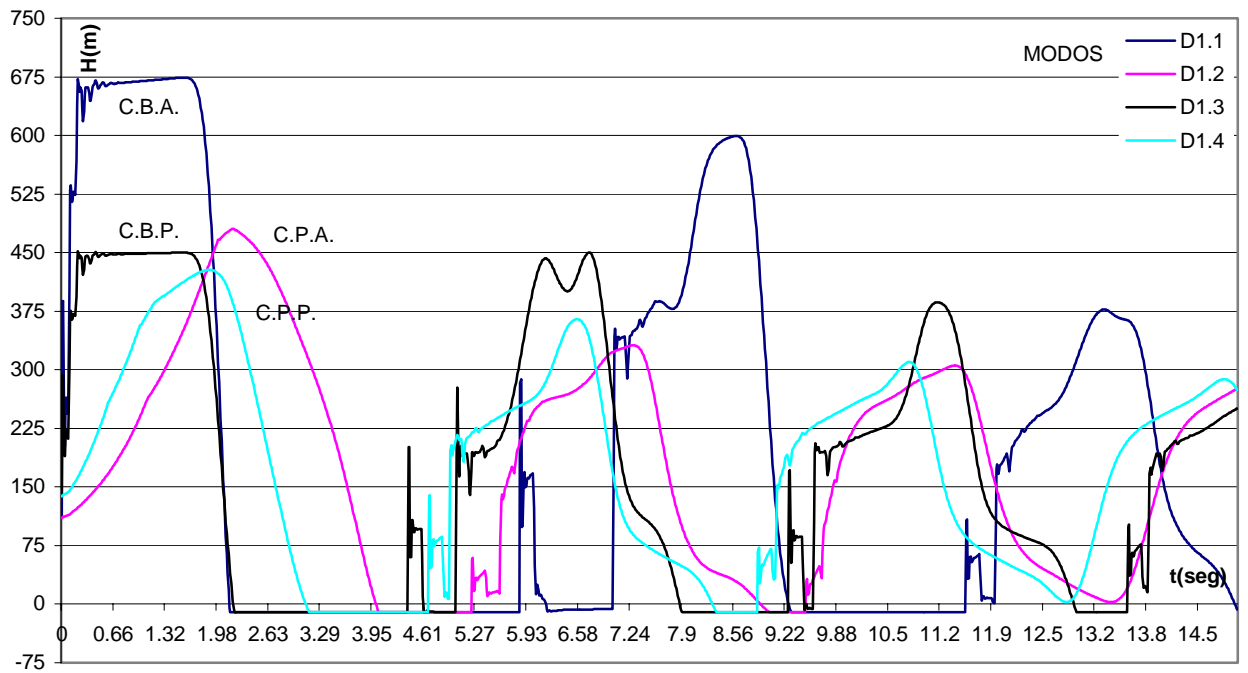


Gráfico No. IV.12.1: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando)

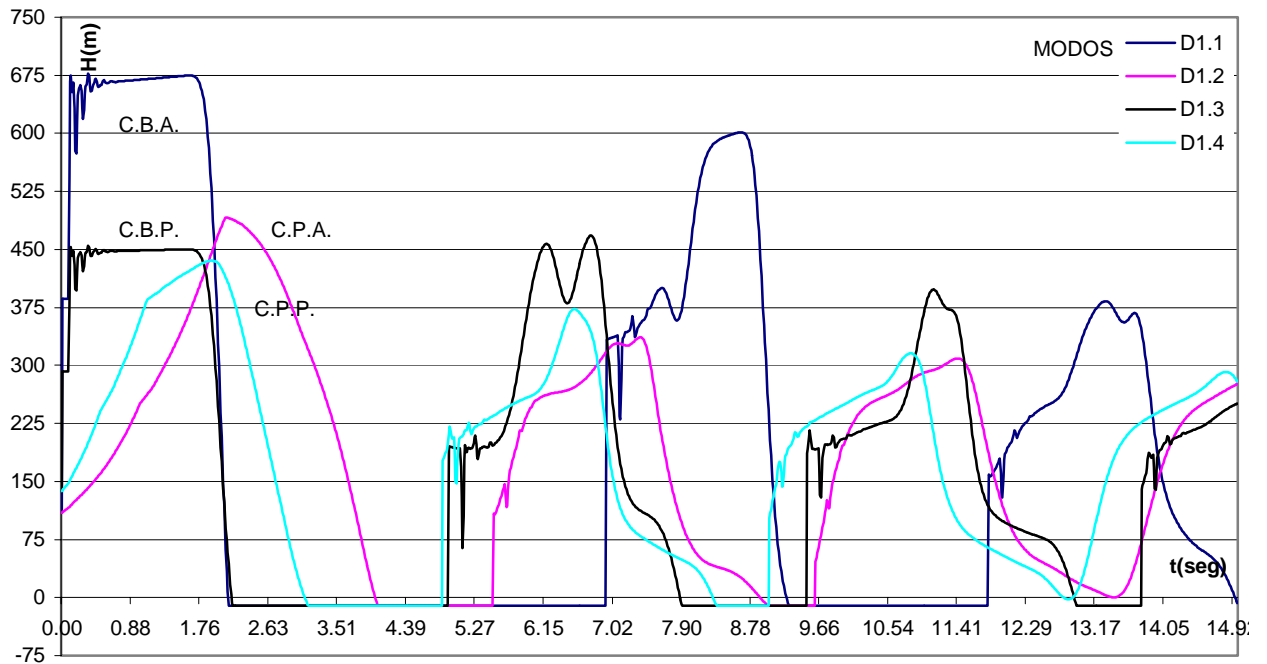


Gráfico No. IV.12.2: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula b (Todas las válvulas operando)

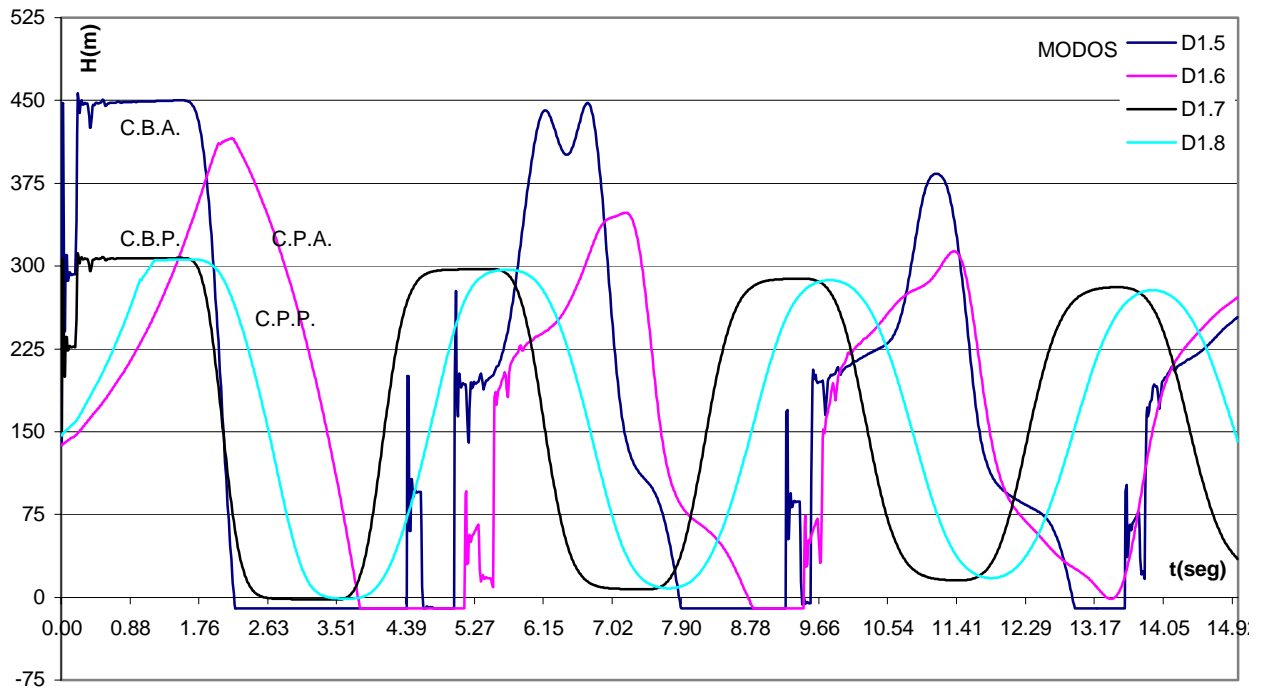


Gráfico No. IV.12.3: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula b totalmente cerrada)

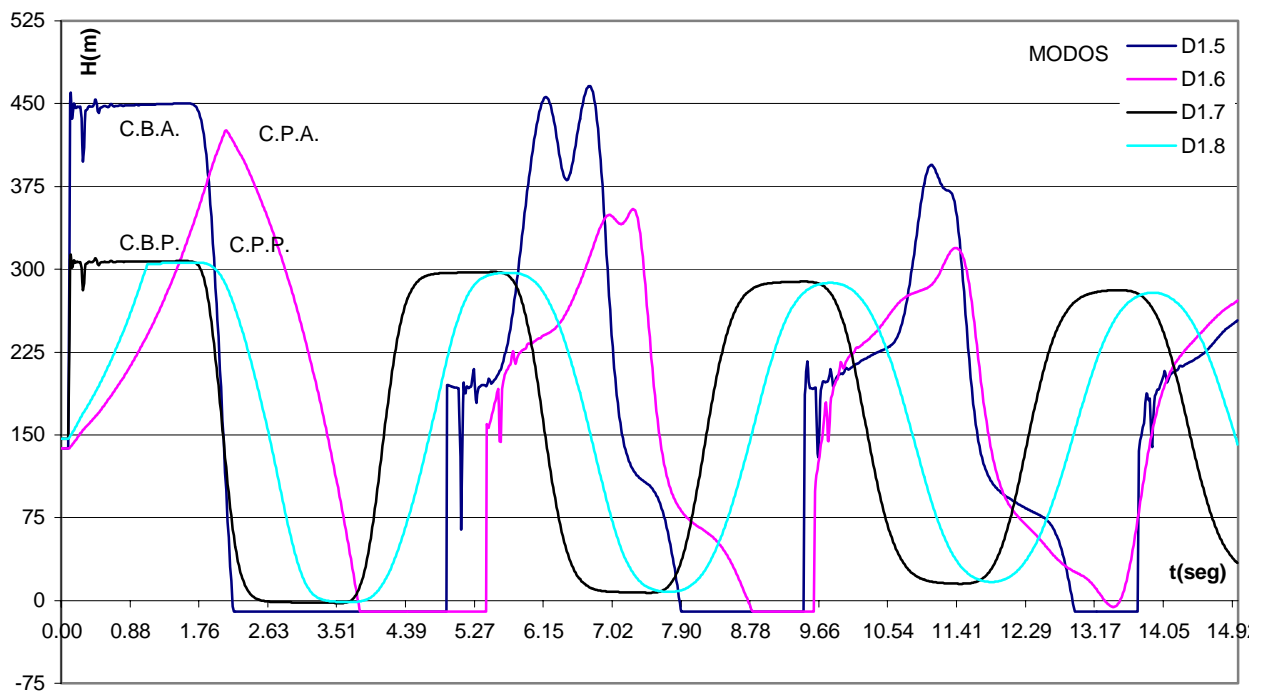


Gráfico No. IV.12.4: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula b totalmente cerrada)

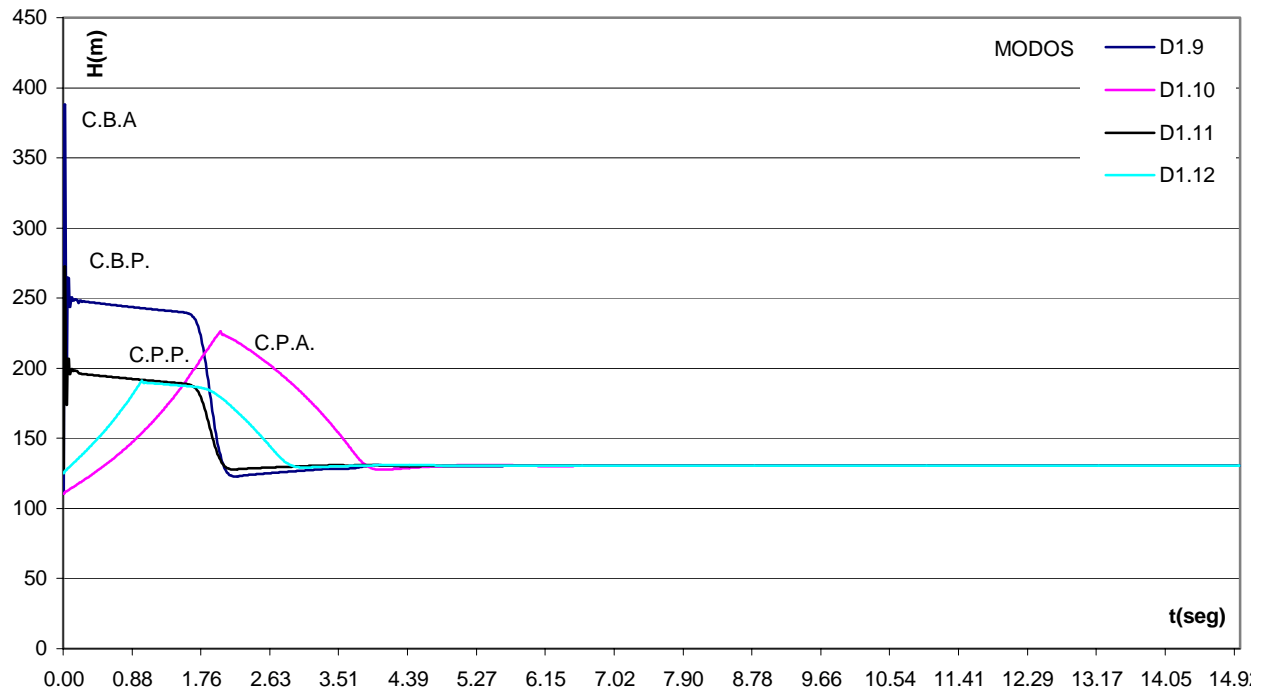


Gráfico No. IV.12.5: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula b totalmente abierta)

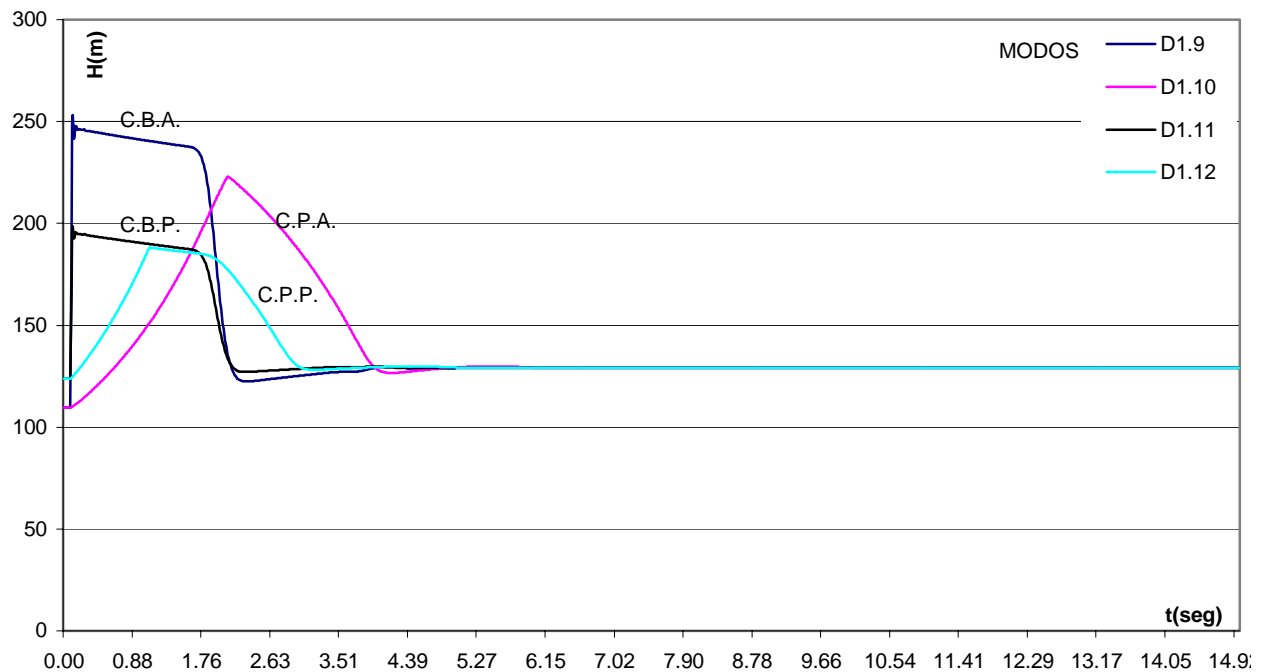


Gráfico No. IV.12.6: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula b totalmente abierta)

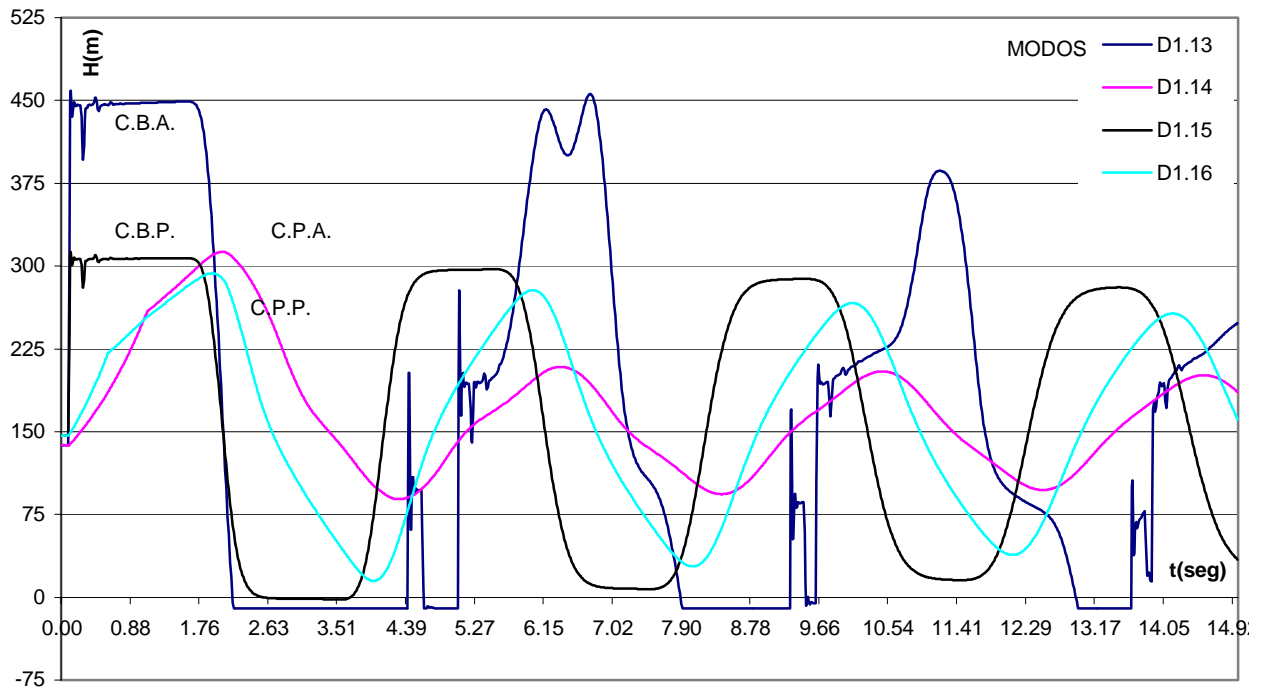


Gráfico IV.12.7: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula a totalmente cerrada)

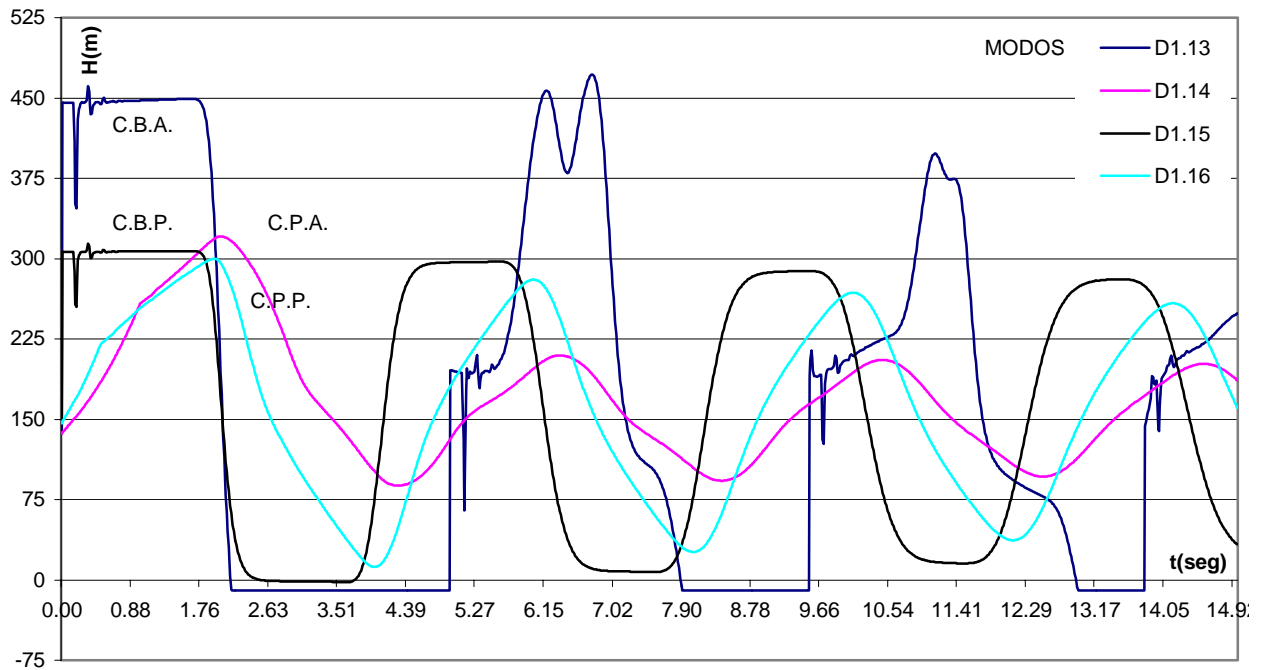


Gráfico IV.12.8: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula a totalmente cerrada)

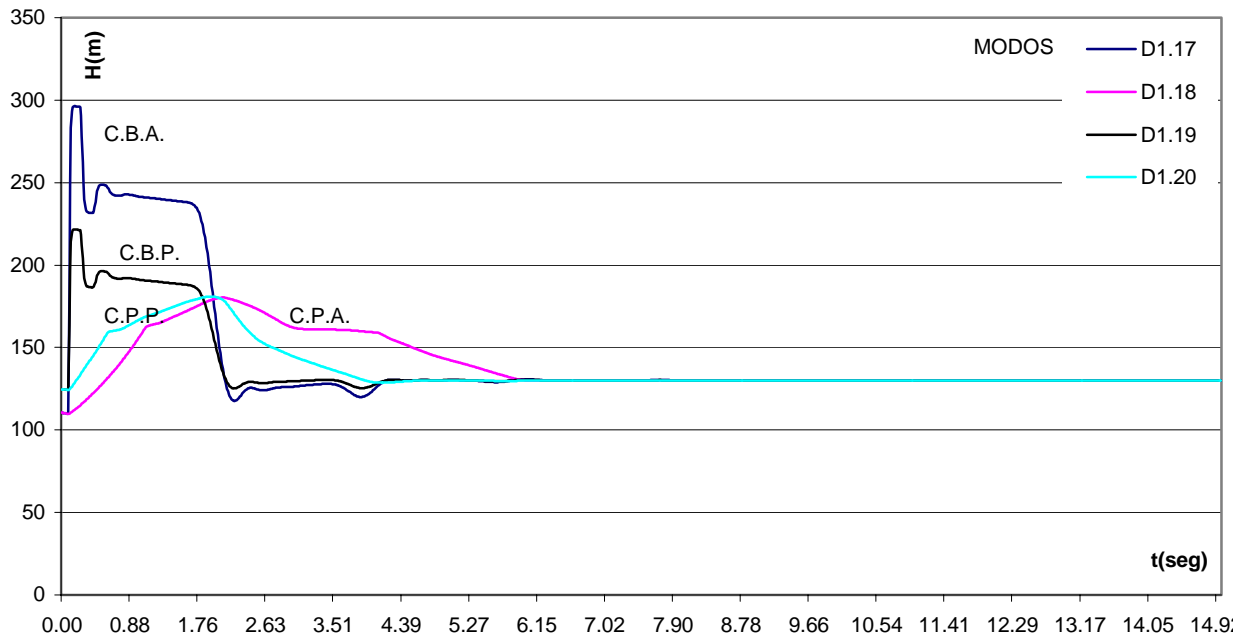


Gráfico IV.12.9: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula a totalmente abierta)

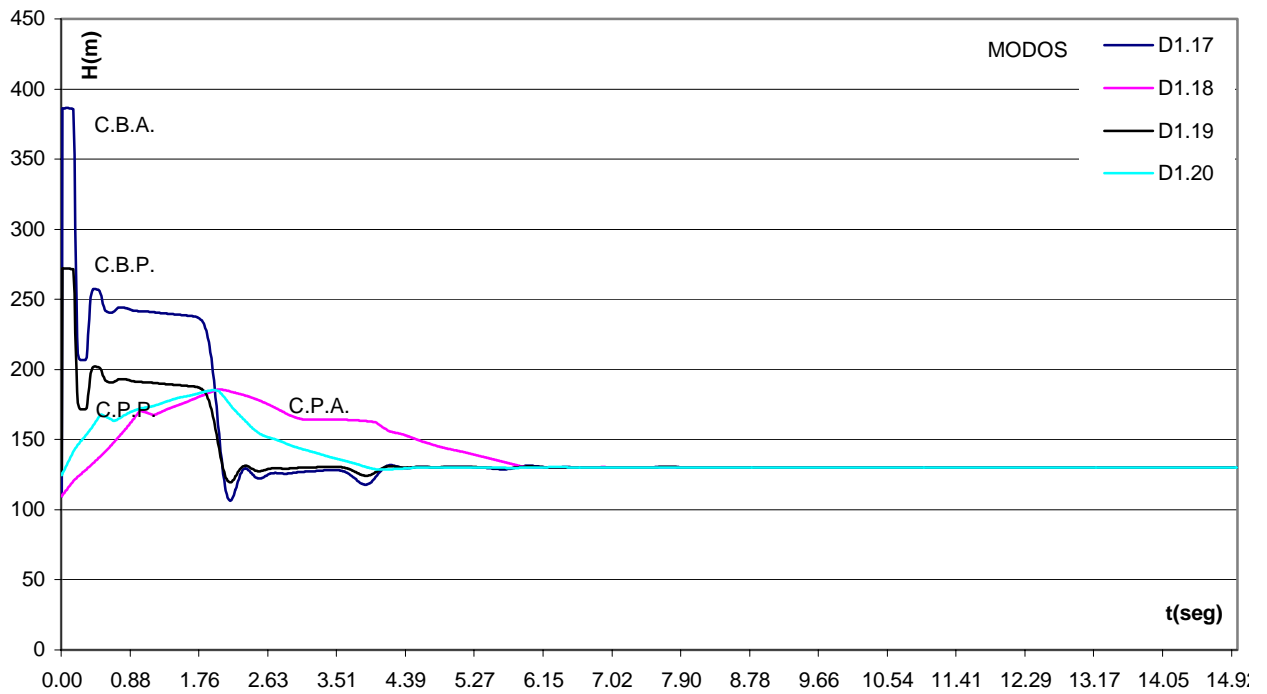


Gráfico IV.12.10: Esquema D.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula a totalmente abierta)

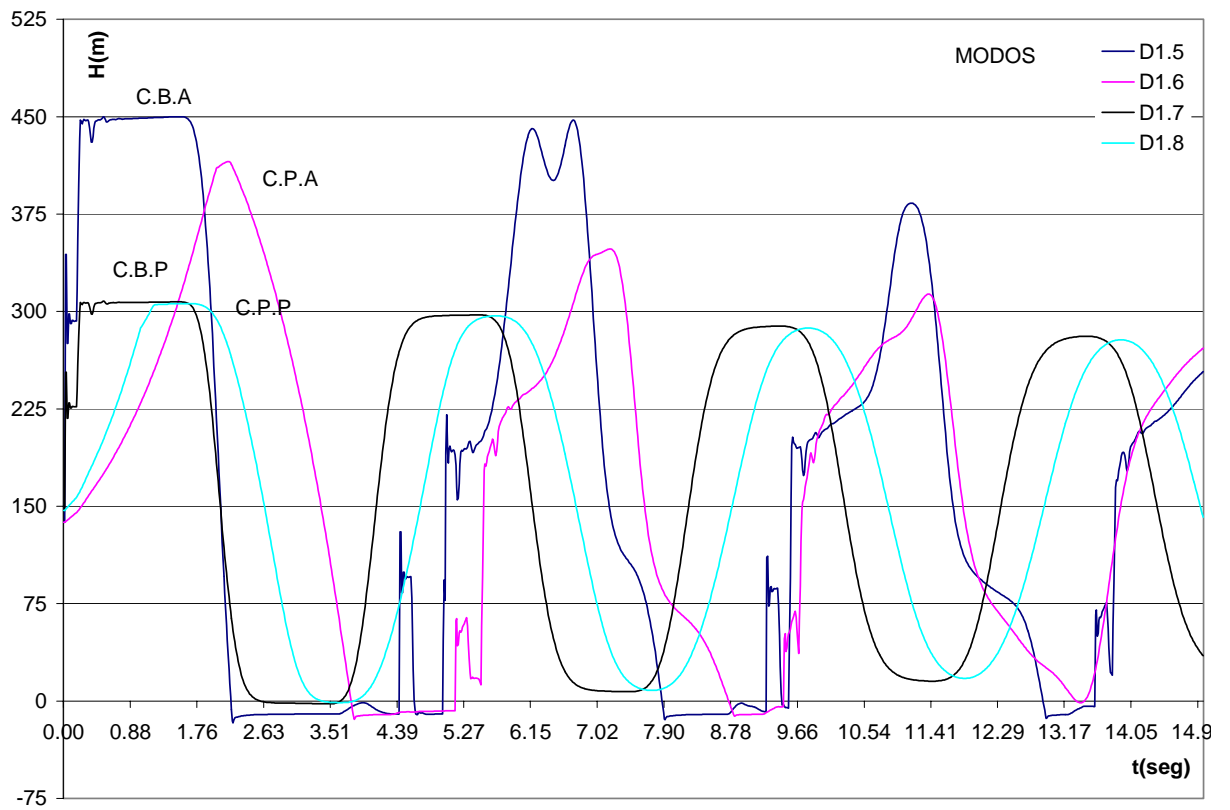


Gráfico No. IV.12.11: Esquema D.1 Variación de presión en el nodo de bifurcación (Válvula b totalmente cerrada)

IV.12.3 Análisis de resultados caso D.1

En las gráficas No. IV.12.1 y IV.12.2 se observa la variación de presión en las válvulas a y b respectivamente, para cuando las válvulas operan al mismo tiempo. Se observan tanto en la gráfica No. IV.12.1 como en la gráfica No. IV.12.2 previamente a los picos de sobrepresión máxima, unas pequeñas variaciones de presión pero con un período de oscilación muy corto, estas variaciones son producidas en los ramales y se deben a lo corto de la longitud de la tubería de los ramales, recordando que la velocidad de onda alcanza una velocidad en este caso de 1275.7 m/s^2 y la longitud de los ramales son de apenas 14 m y 111 m, por esta razón se observa estas pequeñas variaciones que luego se estabilizan con la sobrepresión mayor causada por la tubería principal. A diferencia del caso B.1 no observamos gran influencia de la reflexión y transmisión de ondas de presión en el nodo de unión, permitiendo observar con cierta claridad los ciclos de sobrepresión.

De igual forma se evidencia en las gráficas No. IV.12.1 y IV.12.2 la influencia de los distintos modos de operación, lográndose atenuaciones para los modos de cierre de válvula gradual y más aun en los modos con válvula al inicio parcialmente abiertas ($\tau_i = 0.5$).

A continuación analizaremos el siguientes grupo de gráficas correspondientes a cuando una de las válvulas se encuentra totalmente cerrada:

- IV.12.3 y IV.12.4 (válvula b totalmente cerrada)
- IV.12.7 y IV.12.8 (válvula a totalmente cerrada)

Debido a lo corto en la longitud de los ramales se observa que las diferencia entre los gráficos son mínimas, vemos en los modos de cierre bruscos (D1.5, D1.7, D1.13 y D1.15) prácticamente un comportamiento idéntico en las cuatros gráficas pero con sobrepresiones

levemente mayores en el modo de la válvula a totalmente cerrada. Con respecto a los modos de cierre progresivo si se observan diferencias entre las gráficas No. IV.12.3 y IV.12.4 con respecto a las gráficas No. IV.12.7 y IV.12.8, esto ocasionado por la diferencia en las leyes de cierre de las válvulas, obteniendo como resultado atenuaciones mayores para la ley de cierre de la válvula b (tiempo de cierre mayor).

Por último analizaremos el grupo de gráficas correspondientes a cuando una de las válvulas se encuentra totalmente abierta:

- IV.12.5 y IV.12.6 (válvula b totalmente abierta)
- IV.12.9 y IV.12.10 (válvula a totalmente abierta)

De nuevo debido a lo corto de los ramales notamos que las diferencia entre los gráficos son mínimas, observándose en los modos de cierre bruscos (D1.9, D1.11, D1.17 y D1.19) comportamientos muy parecidos, siendo las sobrepresiones máximas iguales en magnitud pero distintas en duración producido por un período de oscilación mayor. Con respecto al cierre progresivo volvemos a ver la influencia de la ley de cierre en las sobrepresiones generadas. Para finalizar se observa en las cuatro gráficas la rápida atenuación de la sobrepresiones, existiendo prácticamente la sobrepresión original y luego el sistema tiende a su régimen estacionario. Comparando estas gráficas con las del caso B.1 se obtiene una atenuación mucho más efectiva en el caso D.1 y además sobrepresiones de menor magnitud.

En la tabla No. IV.12.3 comparamos las presiones máximas calculadas con el Método de las Características y las presiones calculadas por la ecuación de Joukowsky, observando para el modo D1.1 (cierre brusco ambas válvulas) presiones muchos mayores a las calculadas por Joukowsky en ambas válvulas. Por otro lado se observa en los modos D1.5 y

D1.13 (cierre brusco, un ramal inactivo) presiones mayores a la de Joukowski, reflejando de nuevo la importancia del ramal inactivo en las sobrepresiones del sistema.

De acuerdo a la $H_{adm} = 521.24$ m, solo el modo de operación D1.1 fallarían.

Para estudiar los casos D.2 y D.3 seleccionaremos el modo D1.1 siendo el más crítico al tener las mayores sobrepresiones.

Tabla No. IV.12.3: Caso D.1 Alturas máximas obtenidas en las válvulas.

Modos	H _{máx} (m)	H _{jou} (m)	H _{máx} (m)	H _{jou} (m)
D1.1	674.17	387.81	677.16	385.99
D1.2	480.65	387.81	491.50	385.99
D1.3	451.82	292.48	467.87	292.08
D1.4	428.00	292.48	435.59	292.08
D1.5	456.50	447.09	466.02	0.00
D1.6	415.76	447.09	425.89	0.00
D1.7	311.44	306.52	313.39	0.00
D1.8	306.10	306.52	306.13	0.00
D1.9	387.98	387.81	253.21	385.99
D1.10	226.28	387.81	223.09	385.99
D1.11	272.46	272.41	198.48	417.72
D1.12	191.20	272.41	188.10	417.72
D1.13	458.73	0.00	471.86	445.14
D1.14	312.75	0.00	320.80	445.14
D1.15	313.06	0.00	314.14	306.12
D1.16	293.44	0.00	299.76	306.12
D1.17	296.26	387.81	386.46	385.99
D1.18	180.30	387.81	185.74	385.99
D1.19	221.60	419.51	272.03	271.91
D1.20	180.94	419.51	185.17	271.91

IV.13 CASO D.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO

IV.13.1 Parámetros y características operacionales del caso D.2.

En cada uno de los extremos de los ramales se colocó una válvula de alivio de acuerdo al esquema D.2. La presión de seteo será de $H_{set} = 521.24$ m (de acuerdo a la norma B16.5) y se estudiarán 3 modos de operación (10% Q_0 , 40% Q_0 y 100% Q_0).

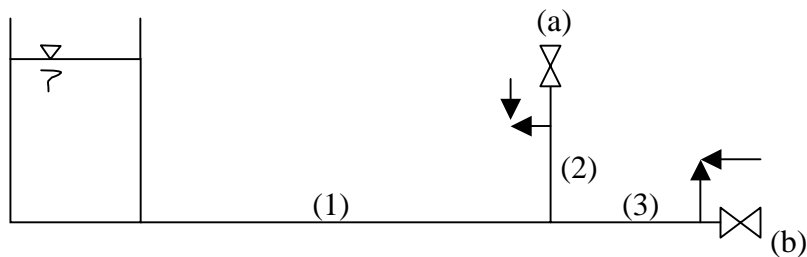


Figura No. IV.13.1 Esquema D.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas,

$L_1 = 1186$ m.

$L_2 = 14$ m.

$L_3 = 111$ m.

$D_1 = 0.5$ m.

$D_2 = 0.5$ m.

$D_3 = 0.5$ m.

Tabla No. IV.13.1: Caso D.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio .

Modos	Válvula a	Válvula b	Q_{ades} (m^3/s)	H_{set} (m)	Q_{bdes} (m^3/s)	H_{bset} (m)
D2.1	C.B.A.	C.B.A.	0.04188	521.24	0.04173	521.24
D2.2	C.B.A.	C.B.A.	0.16752	521.24	0.16692	521.24
D2.3	C.B.A.	C.B.A.	0.41880	521.24	0.41730	521.24

Tabla No. IV.13.2: Caso D.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q_{02} (m^3/s)	Q_{03} (m^3/s)
D2.1	0.4188	0.4173
D2.2	0.4188	0.4173
D2.3	0.4188	0.4173

IV.13.2 Resultados obtenidos en el caso D.2.

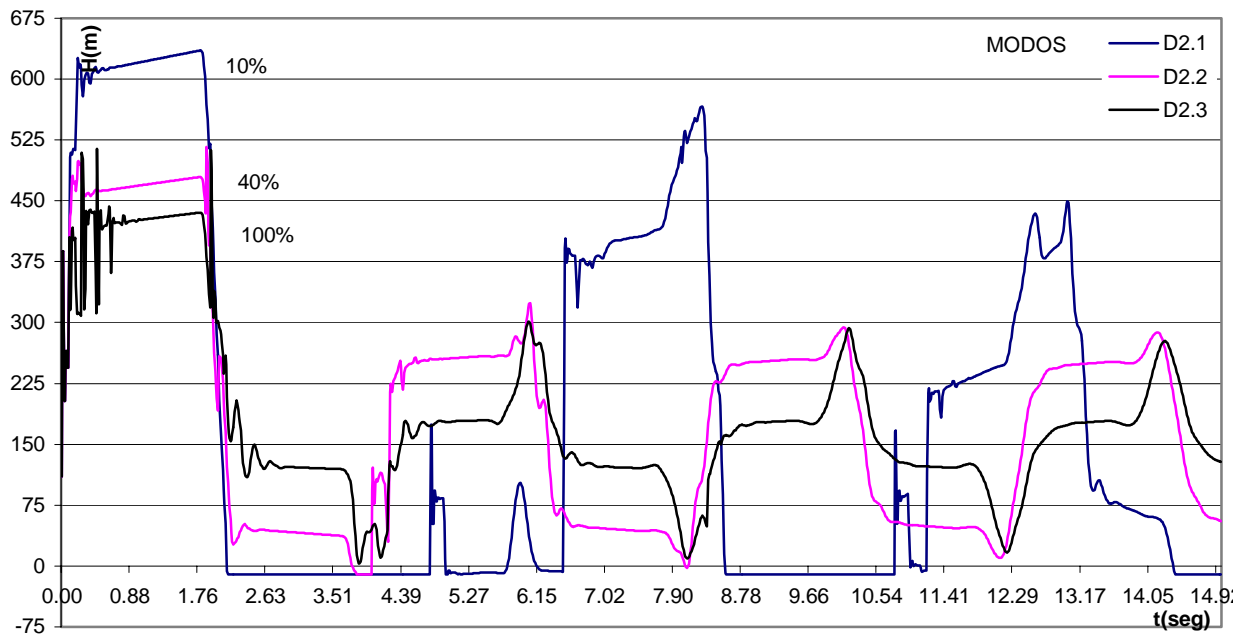


Gráfico No. IV.13.1: Esquema D.2 Variación de presión en la válvula a

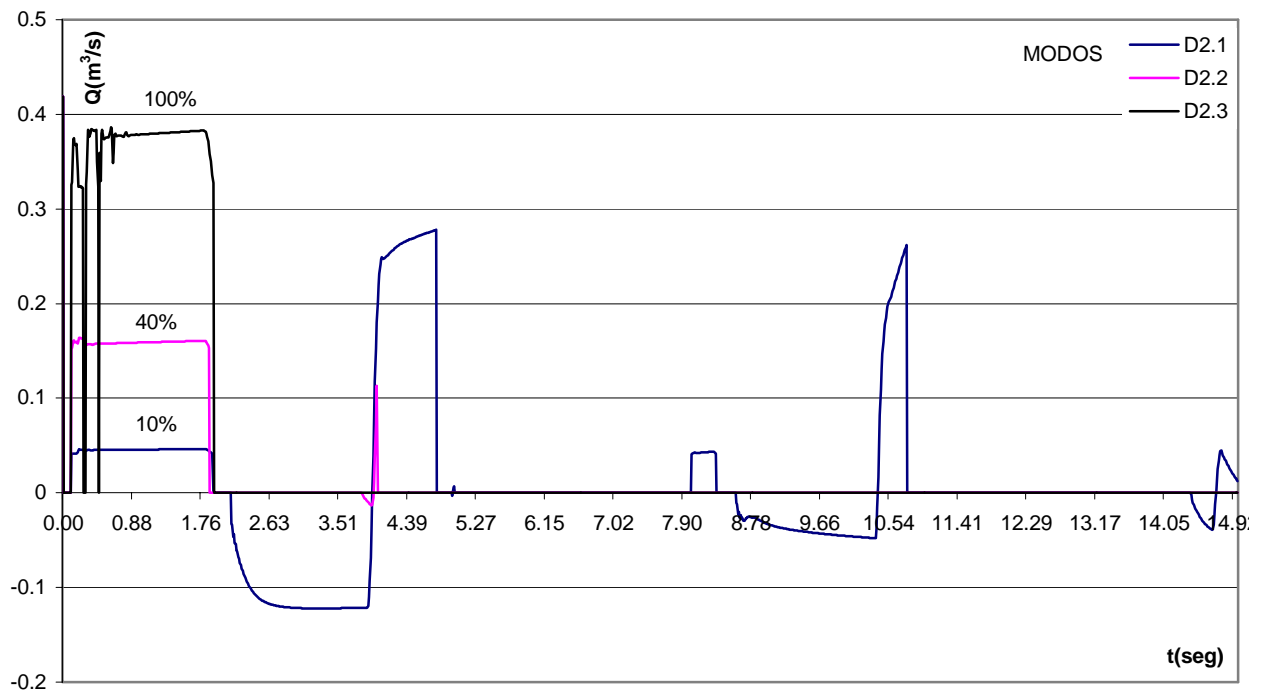


Gráfico No. IV.13.2: Esquema D.2 Variación de caudal en la válvula a

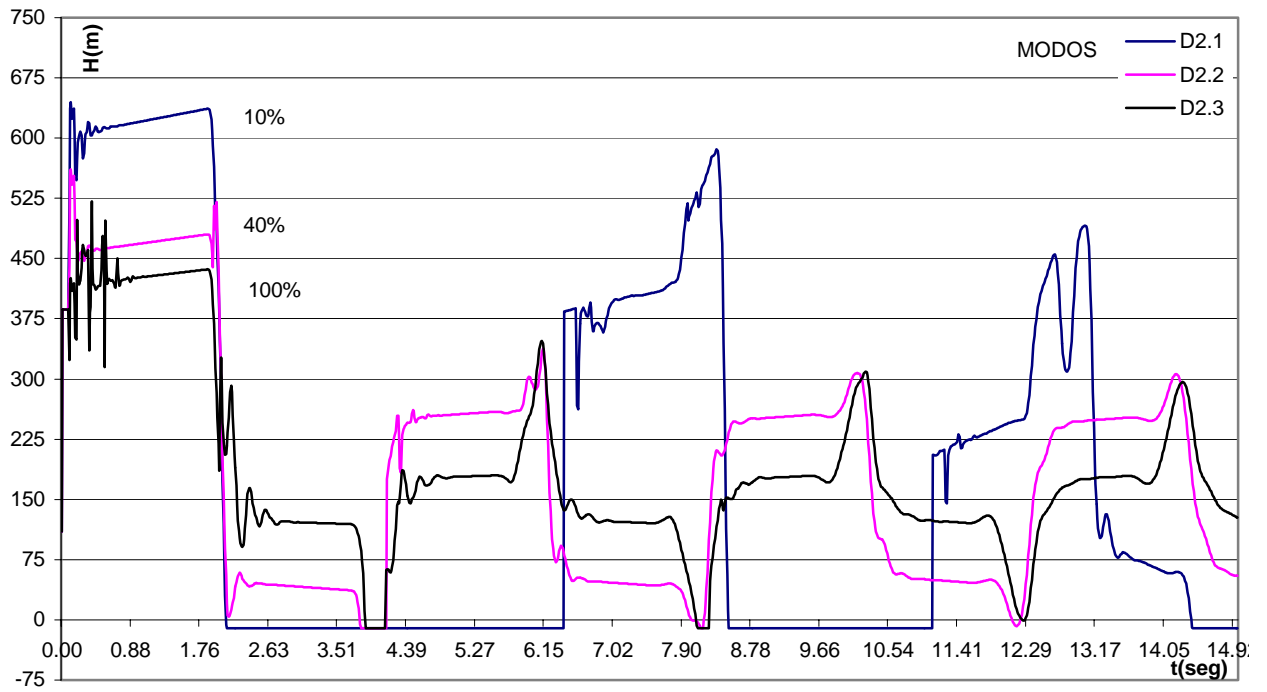


Gráfico No. IV.13.3: Esquema D.2 Variación de presión en la válvula b

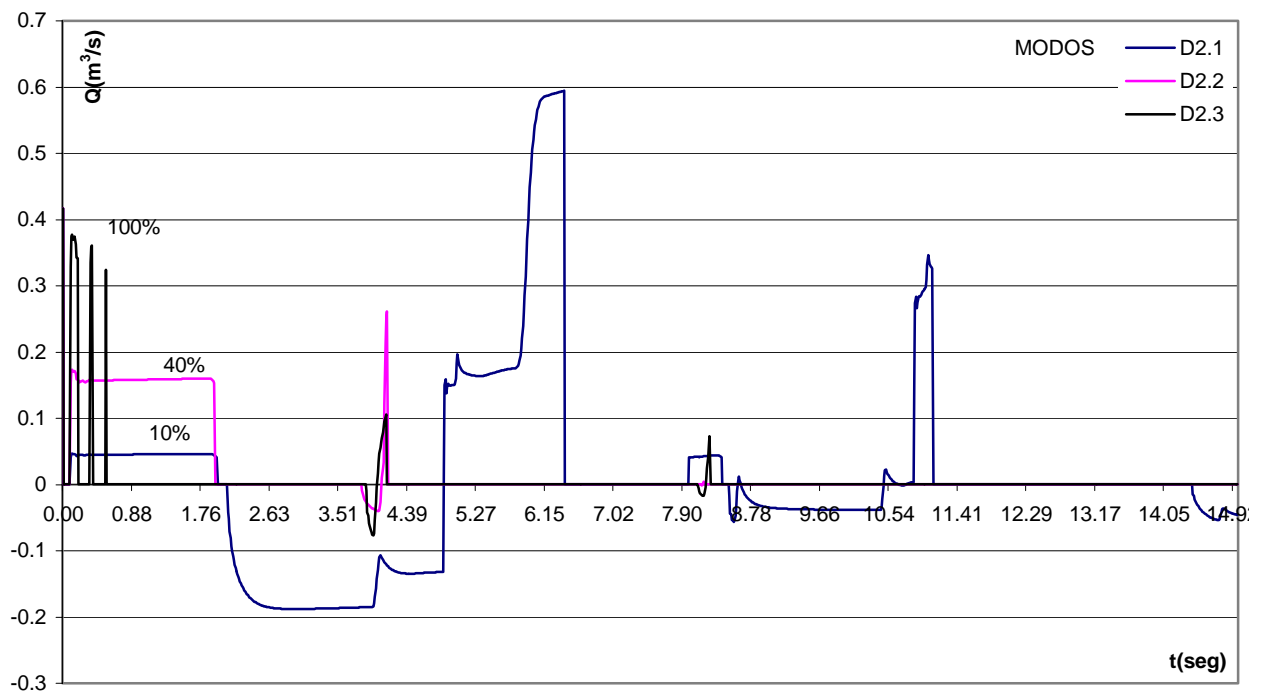


Gráfico No. IV.13.4: Esquema D.2 Variación de caudal en la válvula b

IV.13.3 Análisis de resultados caso D.2

Comenzando con el modo D2.1 se observa en ambas gráficas (IV.13.1 y IV.13.3) que el caudal de desalojo no es suficiente para liberar la presión por debajo de la presión máxima ya que la presión en la válvula *a* y en la válvula *b* sigue aumentando por encima de la presión de seteo de la válvula. En las gráficas No. IV.13.2 y IV.13.4 se observa que las dos válvulas de alivio se abren en dos oportunidades y luego de esta segunda oportunidad se logra bajar las sobrepresiones por debajo de la presión de seteo y en un 33% con respecto a las sobrepresiones obtenidas en el modo D1.1.

Con respecto al modo D2.2 resulta que en el extremo de la válvula *a* (gráfico No. IV.13.1) el sistema se comporta por debajo de la presión máxima, no obstante en el extremo de la válvula *b* (gráfico No. IV.13.3), un caudal de desalojo del 40% de Q_0 no asegura liberar la presión de manera exitosa ya que en el primer intervalo de tiempo se alcanza una altura de 560.79 m. Cabe destacar que solo es necesario que las válvulas se abran en una sola oportunidad para atenuar las sobrepresiones en un 55% en ambas válvulas con respecto al modo D1.1.

Por último con un valor de caudal de desalojo del 100% de Q_0 se asegura mantener las sobrepresiones por debajo de la presión admisible y además se logra una atenuación por el orden de 55% con respecto a las sobrepresiones generadas en el modo D1.1. Analizando los gráficos No. IV.13.2 y IV.13.4 para el modo D2.3 se detecta que las dos válvulas de alivio en el primer intervalo de tiempo abren y cierran repetidas veces ocasionados por los picos de presión generados por los ramales “cortos”, este comportamiento es perjudicial para el sistema ya que cada vez que se abre una válvula de alivio se generan fuerzas de reacción en el sistema debido al impulso del flujo a través de la válvula, a este comportamiento en la industria petrolera se le conoce como “CHATTERING”.

IV.14 CASO D.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-PASS

IV.14.1 Parámetros y características operacionales del caso D.3.

De acuerdo al esquema D.3 se colocó el by-pass antes del nodo de bifurcación de los dos ramales, además se estudia la influencia del by-pass con dos longitudes diferentes.

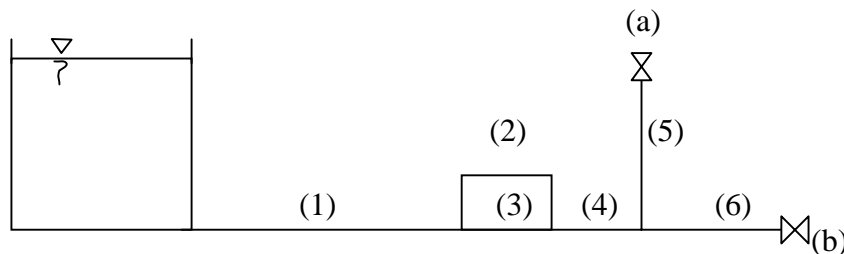


Figura No. IV.14.1 Esquema D.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 1143 m L3 = 22 m L4 = 21 m L5 = 14 m L6 = 111 m
 D1 = 0.5 m D3 = 0.5 m D4 = 0.5 m D5 = 0.5 m D6 = 0.5 m

Tabla No. IV.14.1: Caso D.3 Modos de operación, longitud del by-pass.

Modos	Válvula a	Válvula b	L2 (m)	D2 (m)
D3.1	C.B.A.	C.B.A.	113	0.5
D3.2	C.B.A.	C.B.A.	31	0.5

Tabla No. IV.14.2: Caso D.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	Q03 (m ³ /s)	Q04 (m ³ /s)	Q05 (m ³ /s)	Q06 (m ³ /s)
D3.1	0.8364	0.2561	0.5804	0.8364	0.4190	0.4175
D3.2	0.8370	0.3827	0.4543	0.8370	0.4192	0.4177

IV.14.2 Resultados obtenidos en el caso B.3.

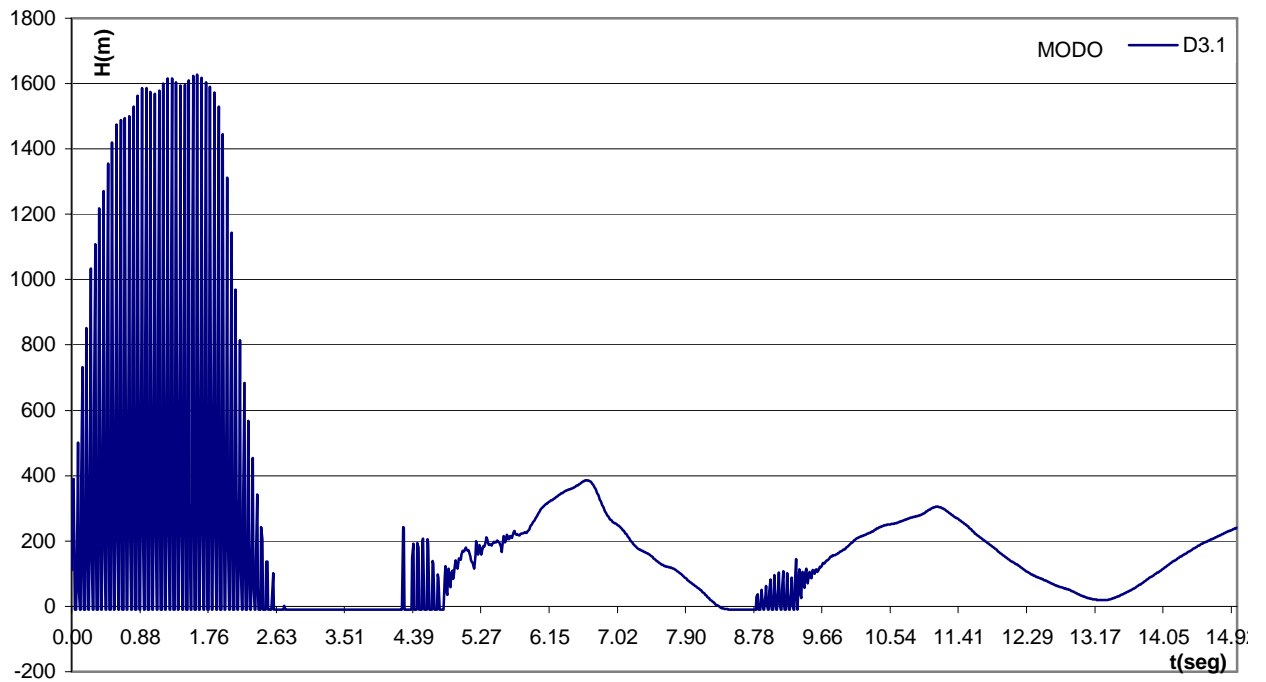


Gráfico No. IV.14.1: Esquema D.3 Variación de presión en la válvula a

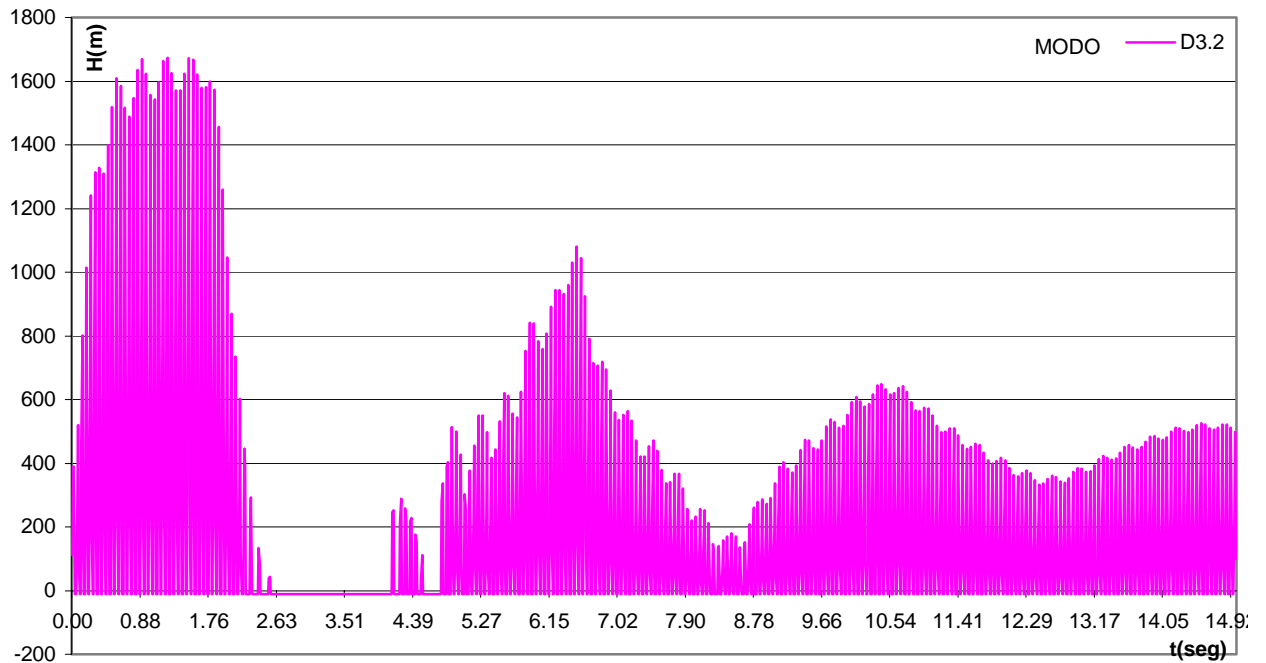


Gráfico No. IV.14.2: Esquema D.3 Variación de presión en la válvula a

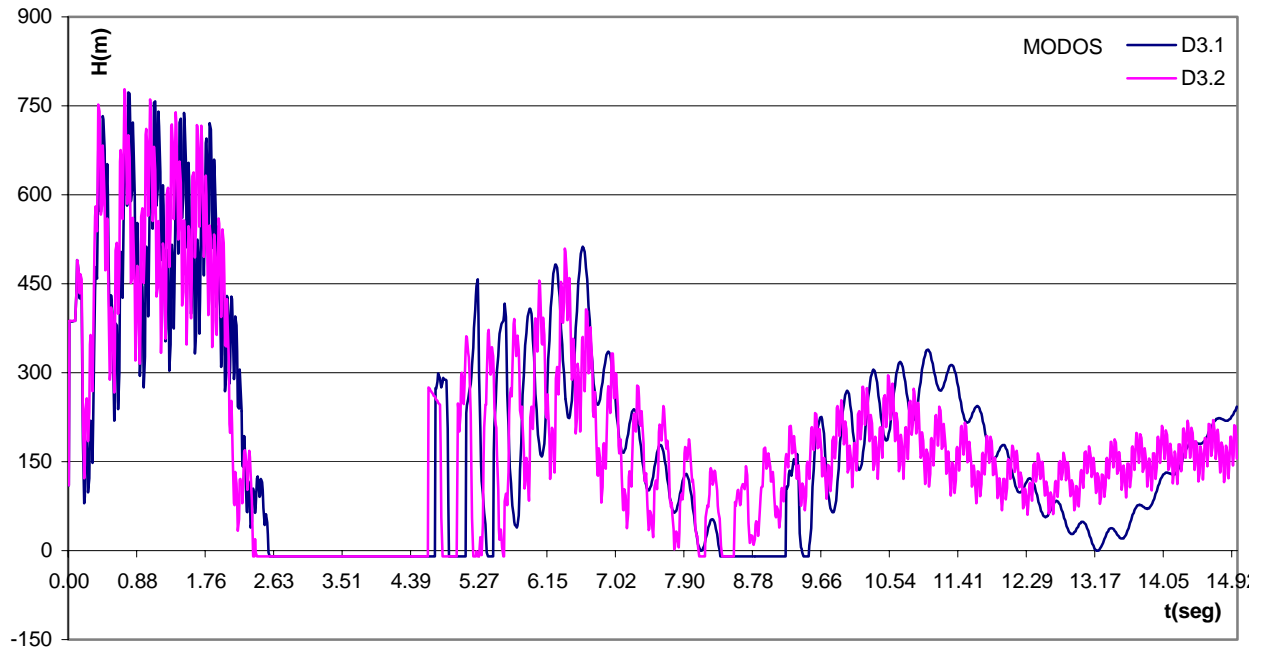


Gráfico No. IV.14.3: Esquema D.3 Variación de presión en la válvula b

IV.14.3 Análisis de resultados caso D.3

Este caso tiene un cuidado especial claramente debido al resultado obtenido en las gráficas, si vemos el comportamiento de una manera general se puede observar que luego de las primeras sobrepresiones, existe una tendencia hacia la atenuación de las mismas. Si se compara este resultado con los resultados obtenidos en el caso B.3 se observa que este comportamiento es similar.

Ahora observando las gráficas No. IV.14.1 y IV.14.2 la primera característica que llama la atención, son las magnitudes de sobrepresión generadas en la válvula *a* tanto en el modo D3.1 como en el modo D3.2. Si se compara este resultado con los obtenidos en el modo D1.1, se tienen sobrepresiones 2.4 veces mayores, además se tiene una oscilación de presiones con una frecuencia de oscilación muy alta. Este comportamiento se atribuye a la inserción del by-pass cerca del nodo de unión de los ramales, creando dos nuevos nodos de unión, conectados entre sí por tuberías muy cortas, por lo tanto el fenómeno de transmisión y reflexión de ondas de presión se incrementa enormemente. Ahora comparando los modos D3.1 y D3.2 entre ellos se observa en las gráficas No. IV.14.1 y IV.14.3 que una mayor longitud del by-pass permite en este caso atenuar mejor la sobrepresión y luego de un tiempo eliminar los ciclos de oscilación con frecuencias muy altas.

Ahora en la válvula *b* que pertenece al ramal de mayor longitud (gráfica No. IV.14.3) se observa un comportamiento más parecido al caso B.3 ya que las sobrepresiones iniciales están en el mismo orden de magnitud y luego de esto ocurre una atenuación de las sobrepresiones en un 55% con respecto al modo D1.1.

IV.15 CASO E.1: SISTEMA HIDRÁULICO SIN PROTECCIÓN

IV.15.1 Parámetros y características operacionales del caso E.1

El esquema E.1 pertenece a un sistema hidráulico que se encuentra conformado por un tanque, una tubería principal y tres ramales “cortos” al final de la tubería principal, cada uno con una válvula en sus extremos. Cada válvula se rige por una ley de cierre diferente. También en este caso existen 52 modos de operación con la finalidad de determinar la influencia de cada ramal. Y además al comparar con el caso C.1 se puede observar la influencia de la longitud de los ramales.

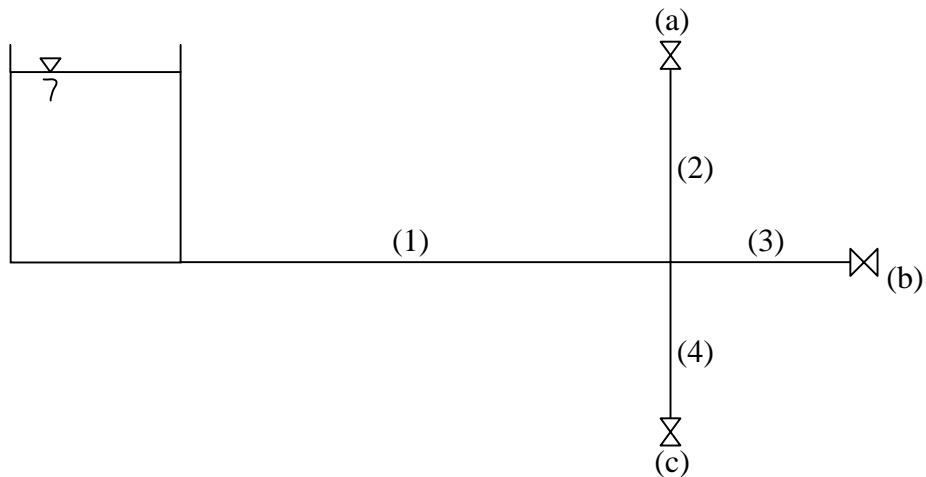


Figura No. IV.15.1 Esquema E.1: Sistema tanque, tuberías y válvulas,

L1 = 1186 m

L2 = 111 m

L3 = 14 m

L4 = 111 m

D1= 0.5 m

D2 = 0.5 m

D3 = 0.5 m

D4 = 0.25 m

Tabla No. IV.15.1: Caso E.1 Modos de operación (D, L de la tubería ctte).

Modos	Válvula a	tc(seg)	τ_i	Válvula b	tc(seg)	τ_i	Válvula c	tc(seg)	τ_i
E1.1	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.2	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.3	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
E1.4	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
E1.5	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
E1.6	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
E1.7	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00
E1.8	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00

E1.9	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
E1.10	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
E1.11	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
E1.12	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00
E1.13	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00
E1.14	T.C	TC	0.00	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00
E1.15	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00
E1.16	T.C	TC	0.00	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00
E1.17	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00
E1.18	T.A	TA	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00
E1.19	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00
E1.20	T.A	TA	1.00	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00
E1.21	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.22	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.23	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50
E1.24	T.C	TC	0.00	T.C	TC	0.00	C.P.P	1.00	0.50
E1.25	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.26	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.27	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50
E1.28	T.A	TA	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.P	1.00	0.50
E1.29	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.30	T.C	TC	0.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.31	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
E1.32	T.C	TC	0.00	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
E1.33	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.34	T.A	TA	1.00	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.35	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50
E1.36	T.A	TA	1.00	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	1.00	0.50
E1.37	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.38	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.39	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00	C.B.P	0.00	0.50
E1.40	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00	C.P.P	1.00	0.50
E1.41	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00	C.B.A	0.00	1.00
E1.42	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00	C.P.A	2.00	1.00
E1.43	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00	C.B.P	0.00	0.50
E1.44	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00	C.P.P	1.00	0.50
E1.45	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.C	TC	0.00
E1.46	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.C	TC	0.00
E1.47	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	T.C	TC	0.00
E1.48	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	T.C	TC	0.00
E1.49	C.B.A	0.00	1.00	C.B.A	0.00	1.00	T.A	TA	1.00
E1.50	C.P.A	4.00	1.00	C.P.A	4.00	1.00	T.A	TA	1.00
E1.51	C.B.P	0.00	0.50	C.B.P	0.00	0.50	T.A	TA	1.00
E1.52	C.P.P	2.00	0.50	C.P.P	2.00	0.50	T.A	TA	1.00

Leyes de cierre de las válvulas:

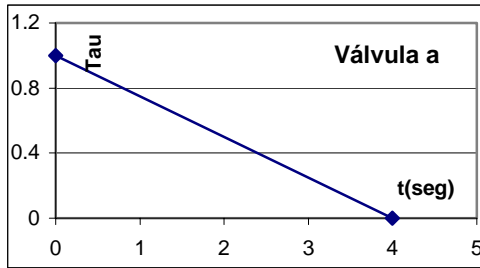


Figura No. IV.15.2 Ley de cierre de la válvula a

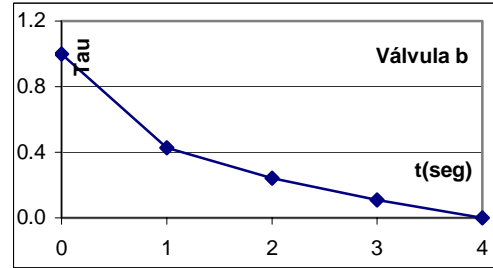


Figura No. IV.15.3 Ley de cierre de la válvula b

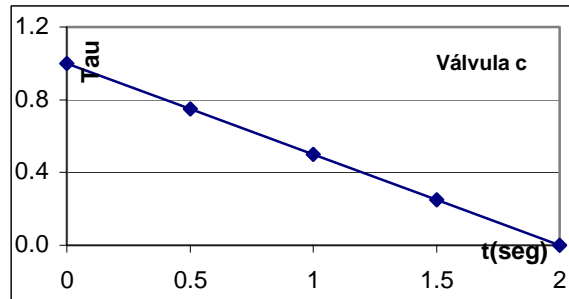


Figura No. IV.15.4 Ley de cierre de la válvula c

Tabla No. IV.15.2: Caso E.1 Condiciones de operación en régimen estacionario

Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	H0(a) (m)	Q03 (m ³ /s)	H0(b) (m)	Q04 (m ³ /s)	H0(c) (m)
E1.1	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.2	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.3	0.6618	0.2228	125.01	0.2230	125.24	0.2159	117.39
E1.4	0.6618	0.2228	125.01	0.2230	125.24	0.2159	117.39
E1.5	0.4658	0.4658	136.60	0.0000	0.00	0.0000	0.00
E1.6	0.4658	0.4658	136.60	0.0000	0.00	0.0000	0.00
E1.7	0.2411	0.2411	146.41	0.0000	0.00	0.0000	0.00
E1.8	0.2411	0.2411	146.41	0.0000	0.00	0.0000	0.00
E1.9	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.10	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.11	0.9479	0.1984	99.07	0.3969	99.17	0.3526	78.26
E1.12	0.9479	0.1984	99.07	0.3969	99.17	0.3526	78.26
E1.13	0.4674	0.0000	0.00	0.4674	137.52	0.0000	0.00
E1.14	0.4674	0.0000	0.00	0.4674	137.52	0.0000	0.00

E1.15	0.2414	0.0000	0.00	0.2414	146.67	0.0000	0.00
E1.16	0.2414	0.0000	0.00	0.2414	146.67	0.0000	0.00
E1.17	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.18	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.19	0.9470	0.3957	98.54	0.1986	99.34	0.3528	78.33
E1.20	0.9470	0.3957	98.54	0.1986	99.34	0.3528	78.33
E1.21	0.4188	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.4188	110.43
E1.22	0.4188	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.4188	110.43
E1.23	0.2338	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.2338	137.67
E1.24	0.2338	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.2338	137.67
E1.25	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.26	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.27	0.9717	0.3903	95.89	0.3917	96.59	0.1897	90.61
E1.28	0.9717	0.3903	95.89	0.3917	96.59	0.1897	90.61
E1.29	0.8020	0.0000	0.00	0.4247	113.56	0.3773	89.61
E1.30	0.8020	0.0000	0.00	0.4247	113.56	0.3773	89.61
E1.31	0.4607	0.0000	0.00	0.2341	137.98	0.2266	129.33
E1.32	0.4607	0.0000	0.00	0.2341	137.98	0.2266	129.33
E1.33	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.34	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.35	0.8313	0.4181	110.06	0.2099	110.96	0.2032	104.00
E1.36	0.8313	0.4181	110.06	0.2099	110.96	0.2032	104.00
E1.37	0.8009	0.4234	112.84	0.0000	0.00	0.3775	89.70
E1.38	0.8009	0.4234	112.84	0.0000	0.00	0.3775	89.70
E1.39	0.4605	0.2339	137.74	0.0000	0.00	0.2266	129.34
E1.40	0.4605	0.2339	137.74	0.0000	0.00	0.2266	129.34
E1.41	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.42	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.43	0.8323	0.2096	110.66	0.4195	110.78	0.2031	103.92
E1.44	0.8323	0.2096	110.66	0.4195	110.78	0.2031	103.92
E1.45	0.8361	0.4173	109.61	0.4188	110.42	0.0000	0.00
E1.46	0.8361	0.4173	109.61	0.4188	110.42	0.0000	0.00
E1.47	0.4674	0.2336	137.38	0.2338	137.63	0.0000	0.00
E1.48	0.4674	0.2336	137.38	0.2338	137.63	0.0000	0.00
E1.49	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.50	1.0653	0.3679	85.22	0.3693	85.85	0.3280	67.74
E1.51	0.8020	0.2123	113.45	0.2125	113.66	0.3773	89.62
E1.52	0.8020	0.2123	113.45	0.2125	113.66	0.3773	89.62

IV.9.2 Resultados obtenidos en el caso E.1.

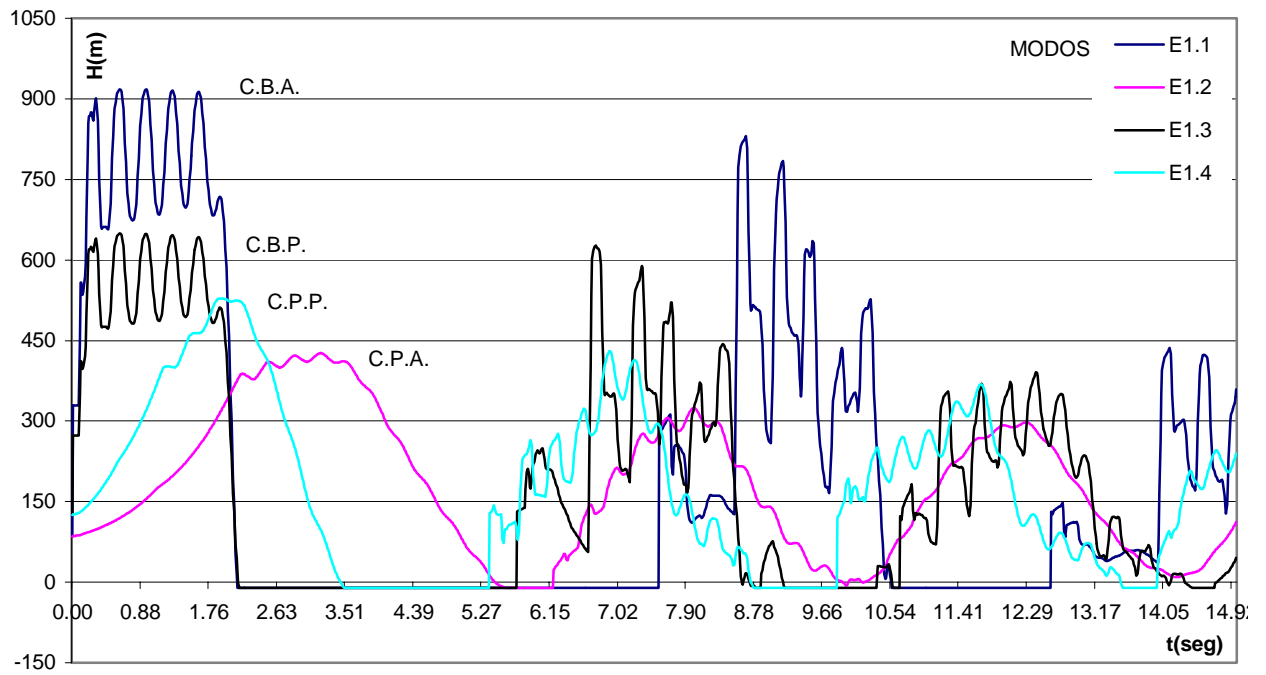


Gráfico No. IV.15.1: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Todas las válvulas operando)

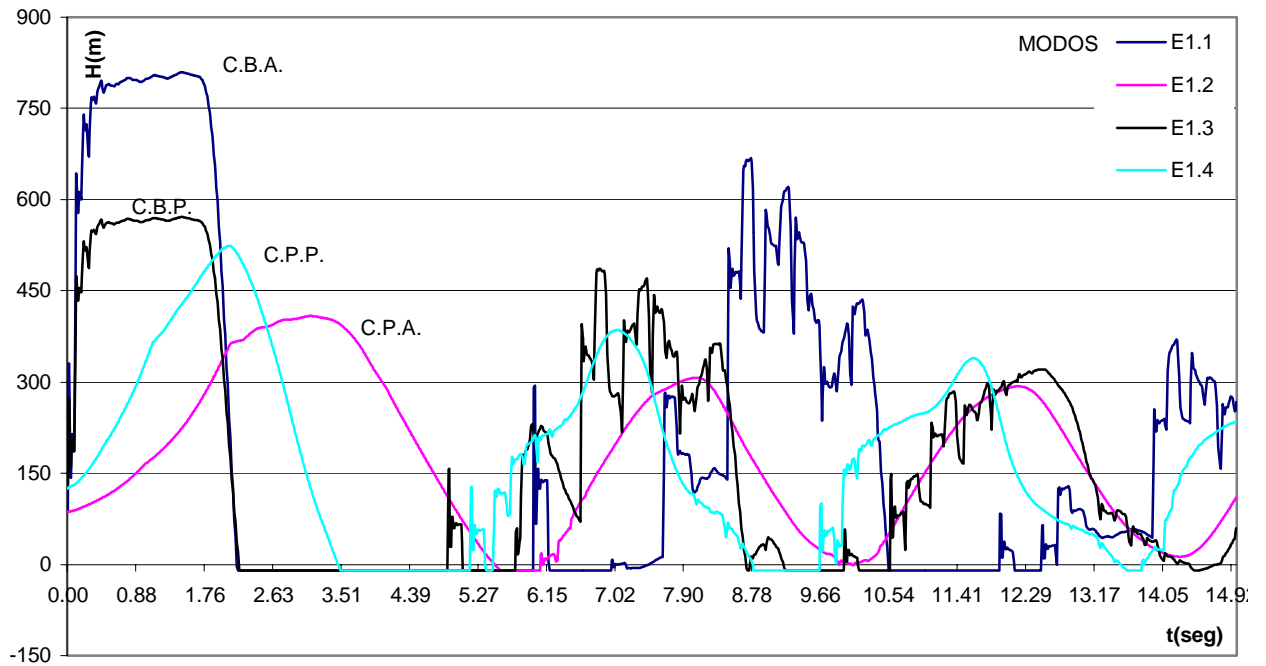


Gráfico No. IV.15.2: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Todas las válvulas operando)

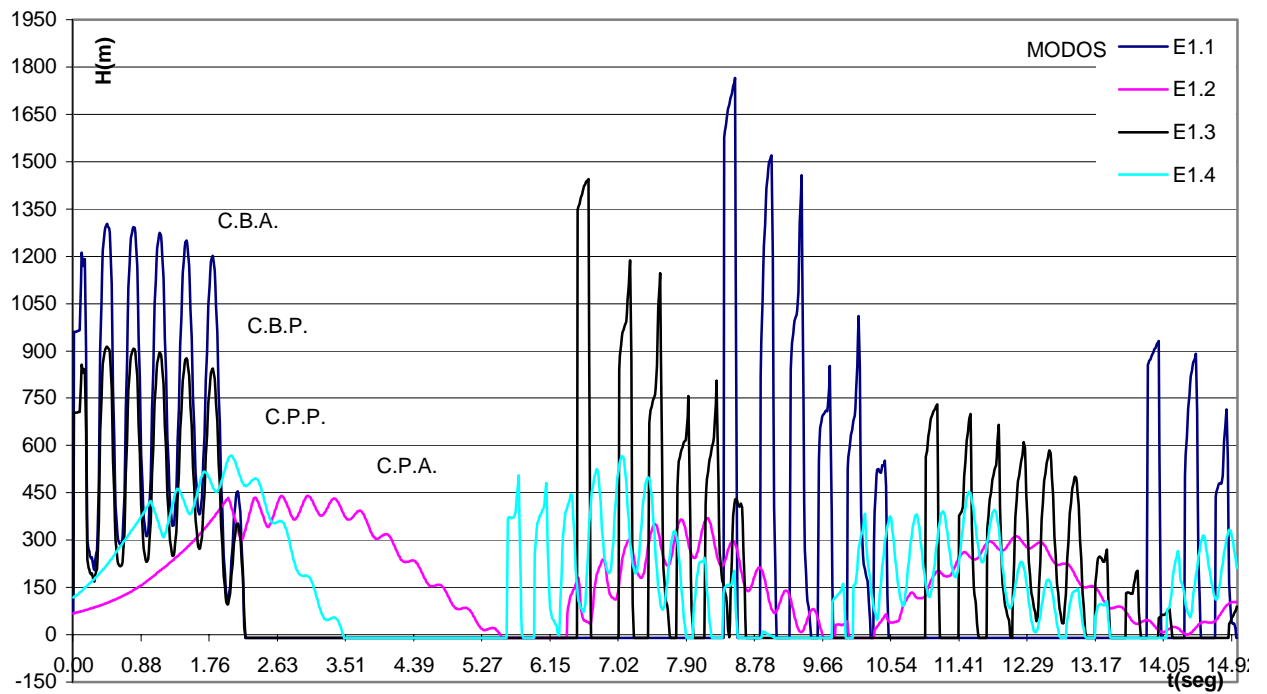


Gráfico No. IV.15.3: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Todas las válvulas operando)

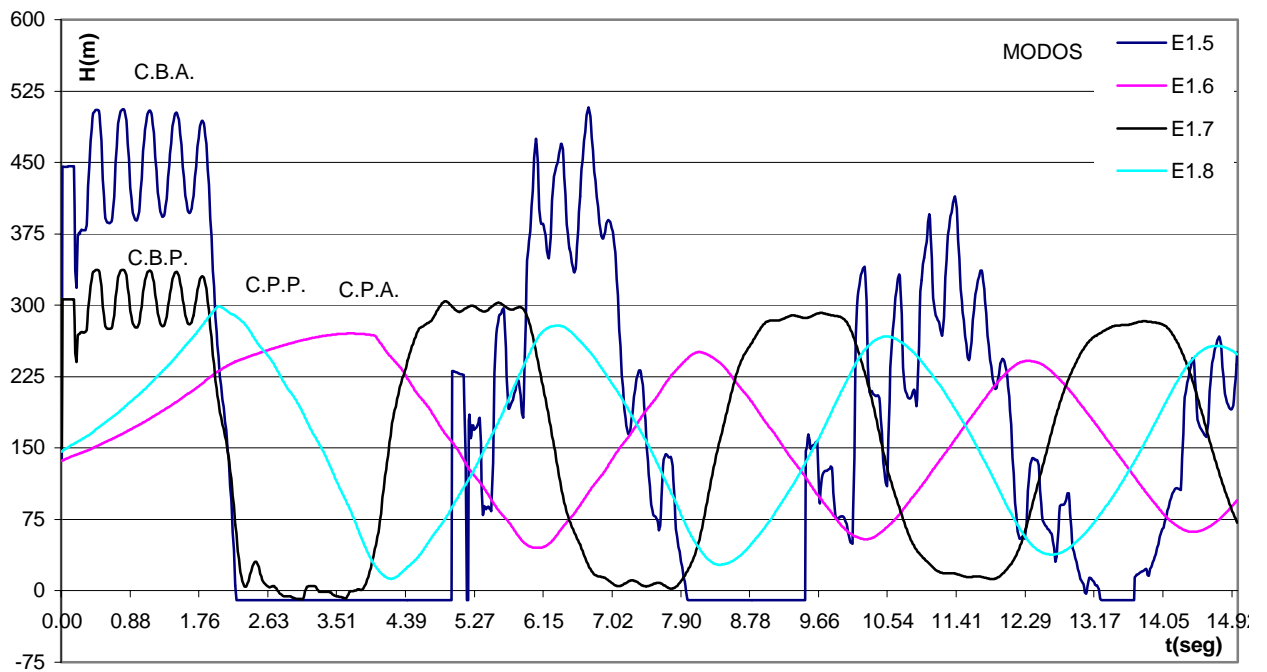


Gráfico No. IV.15.4: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas b y c totalmente cerradas)

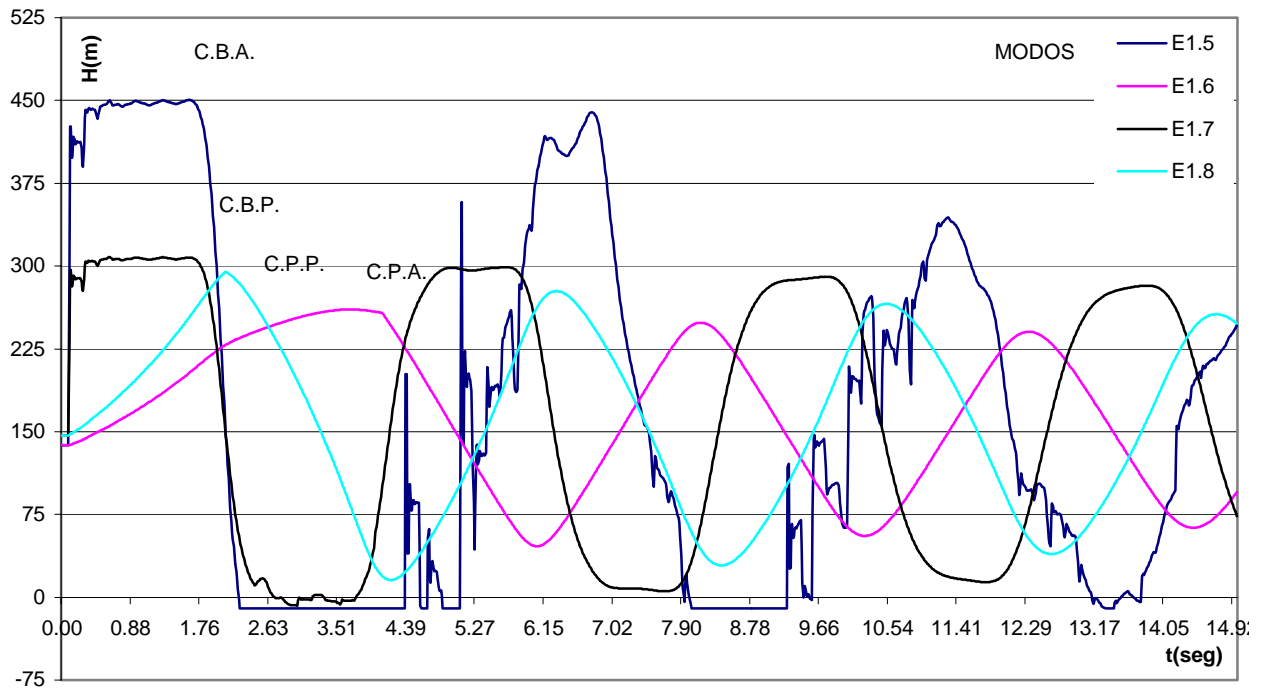


Gráfico No. IV.15.5: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas b y c totalmente cerradas)

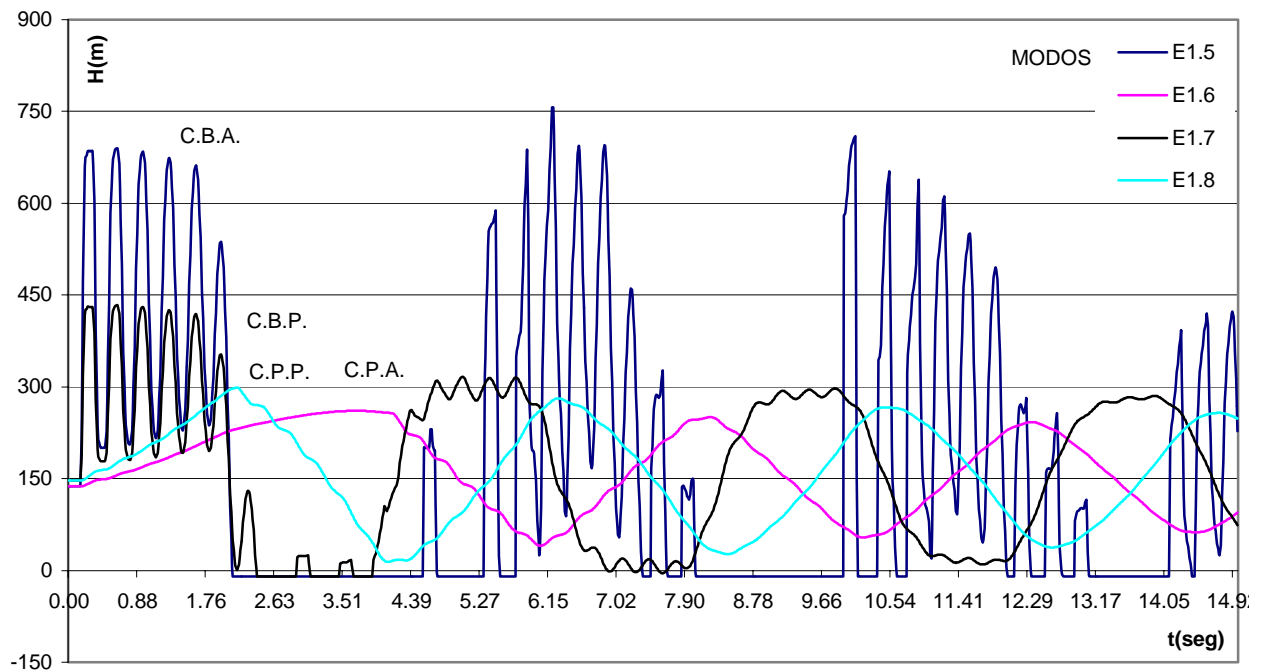


Gráfico IV.15.6: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas b y c totalmente cerradas)

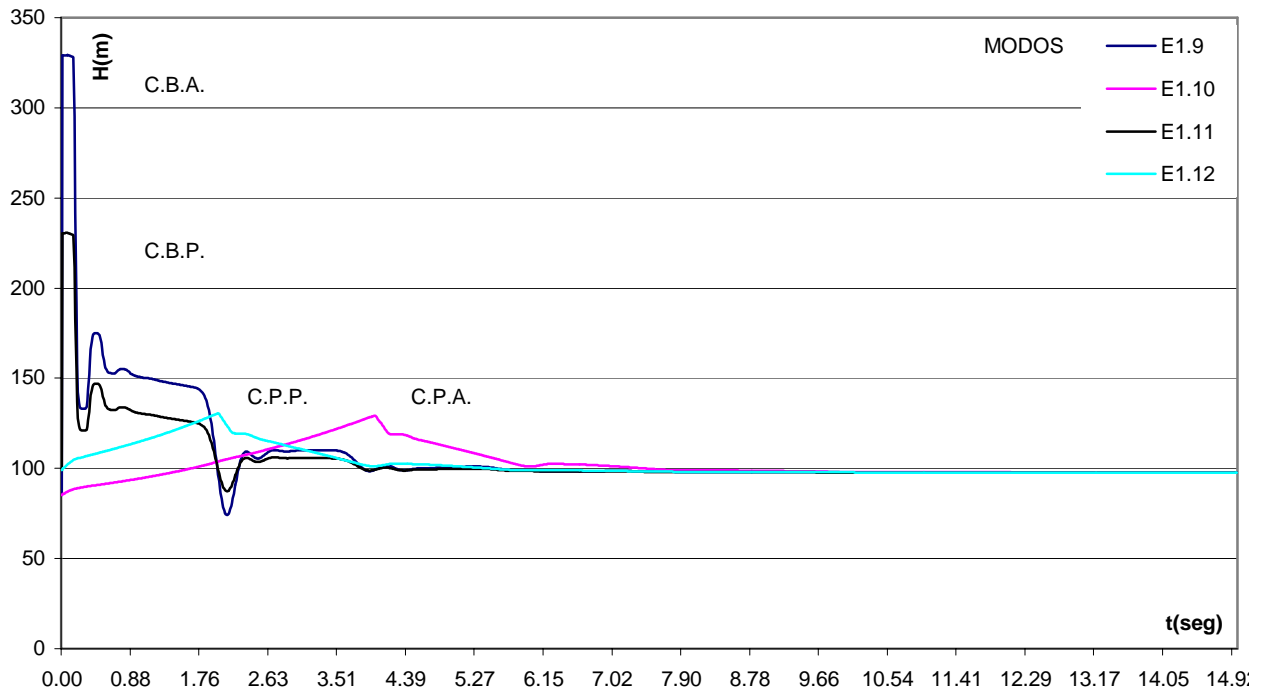


Gráfico IV.15.7: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas b y c totalmente abiertas)

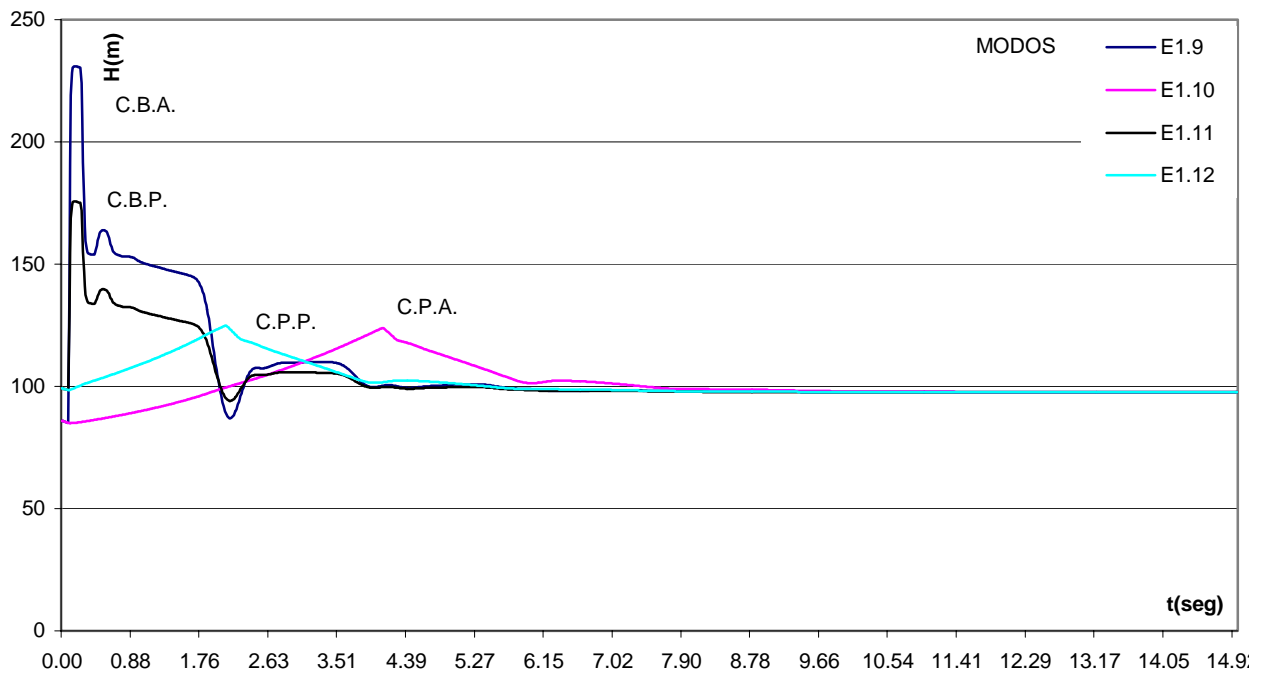


Gráfico IV.15.8: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas b y c totalmente abiertas)

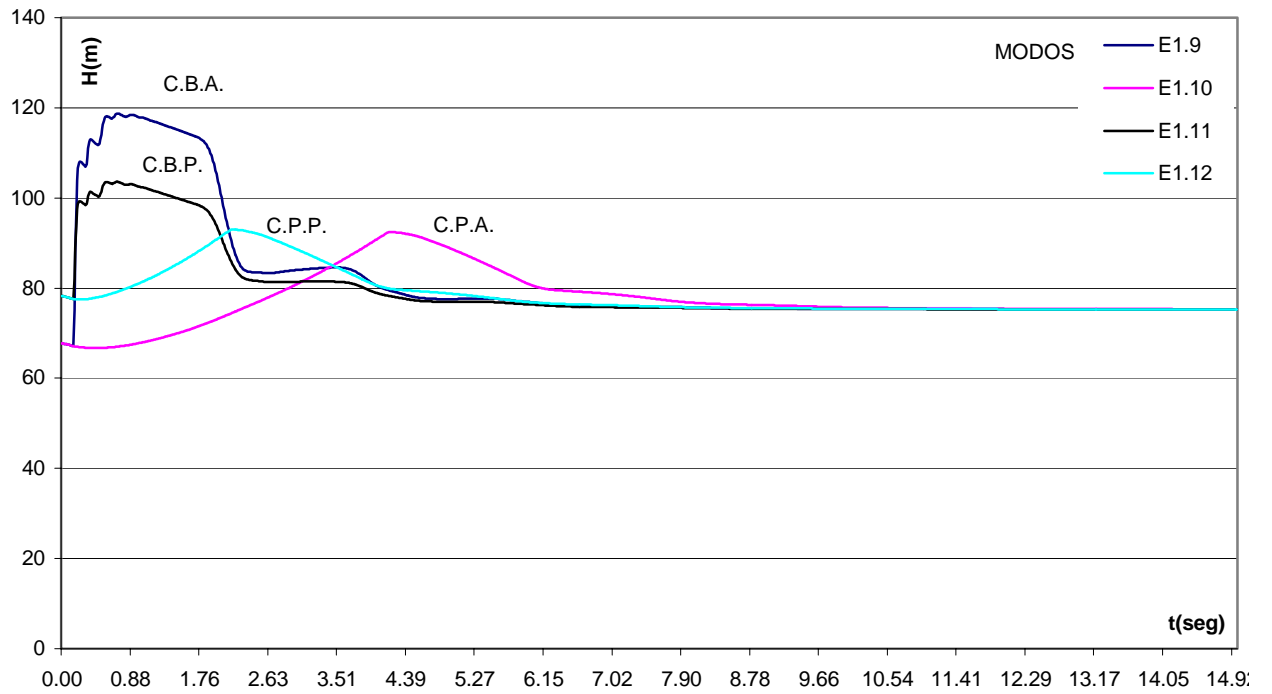


Gráfico IV.15.9: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas b y c totalmente abiertas)

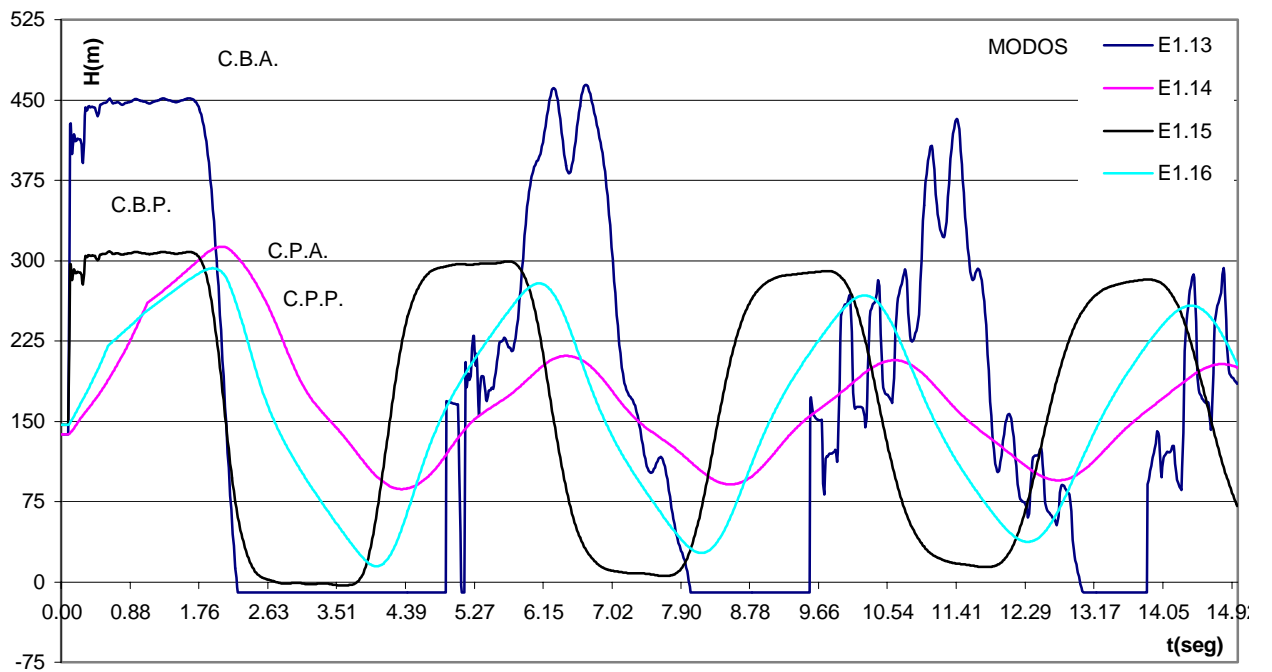


Gráfico IV.15.10: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas a y c totalmente cerradas)

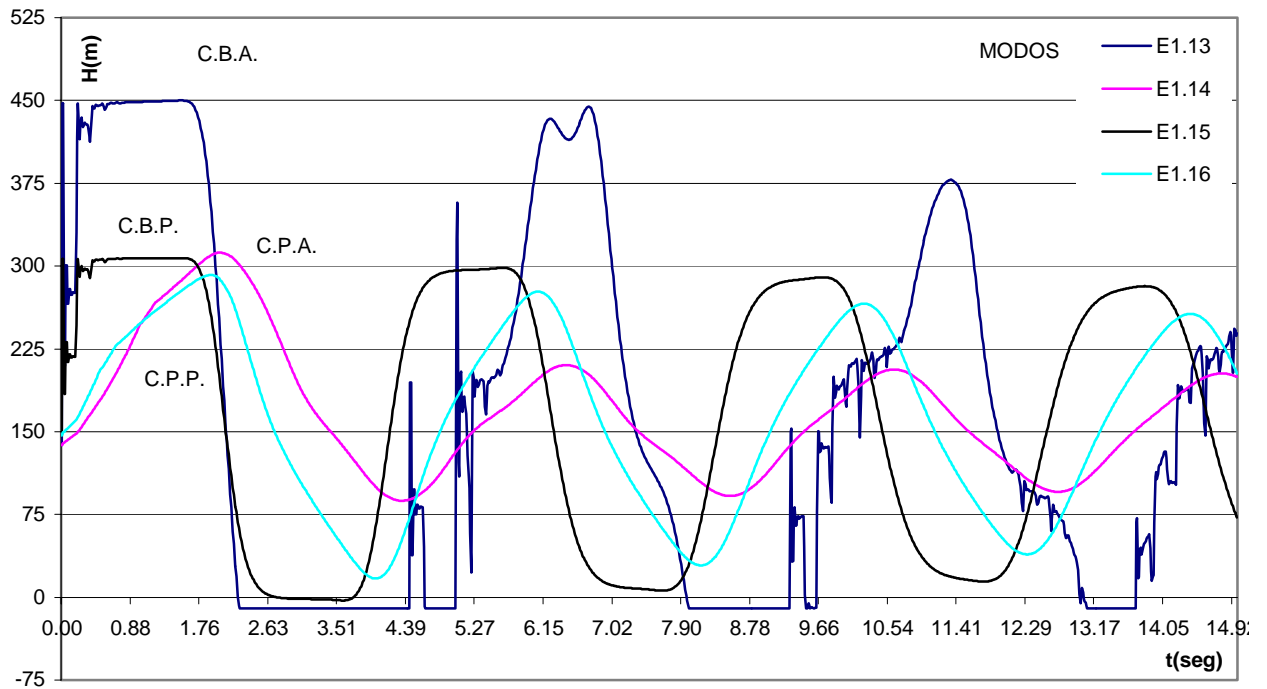


Gráfico No. IV.15.11: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas a y c totalmente cerradas)

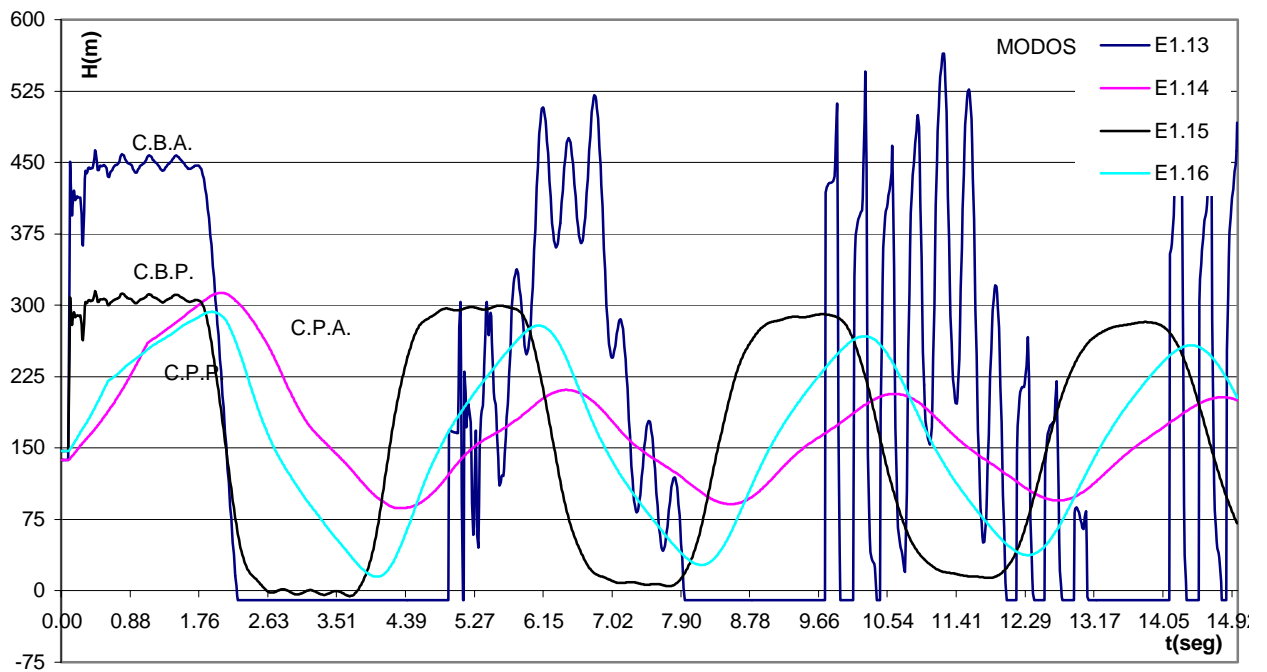


Gráfico No. IV.15.12: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas a y c totalmente cerradas)

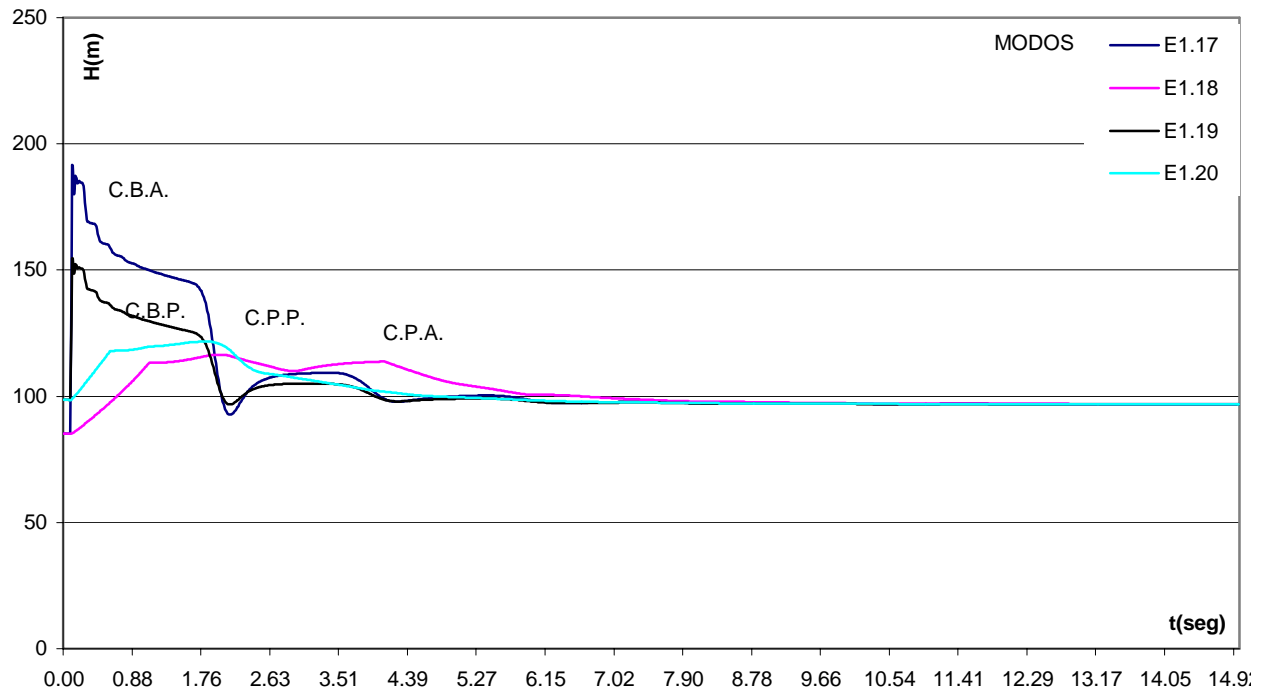


Gráfico No. IV.15.13: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas a y c totalmente abiertas)

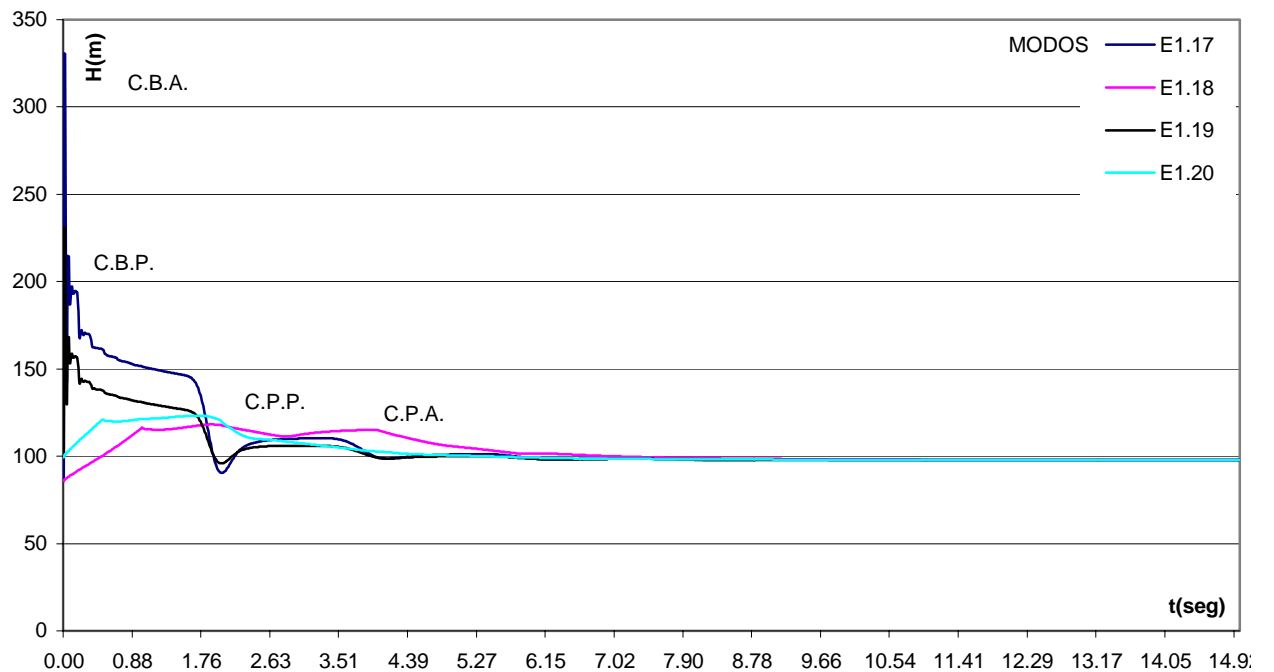


Gráfico No. IV.15.14: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas a y c totalmente abiertas)

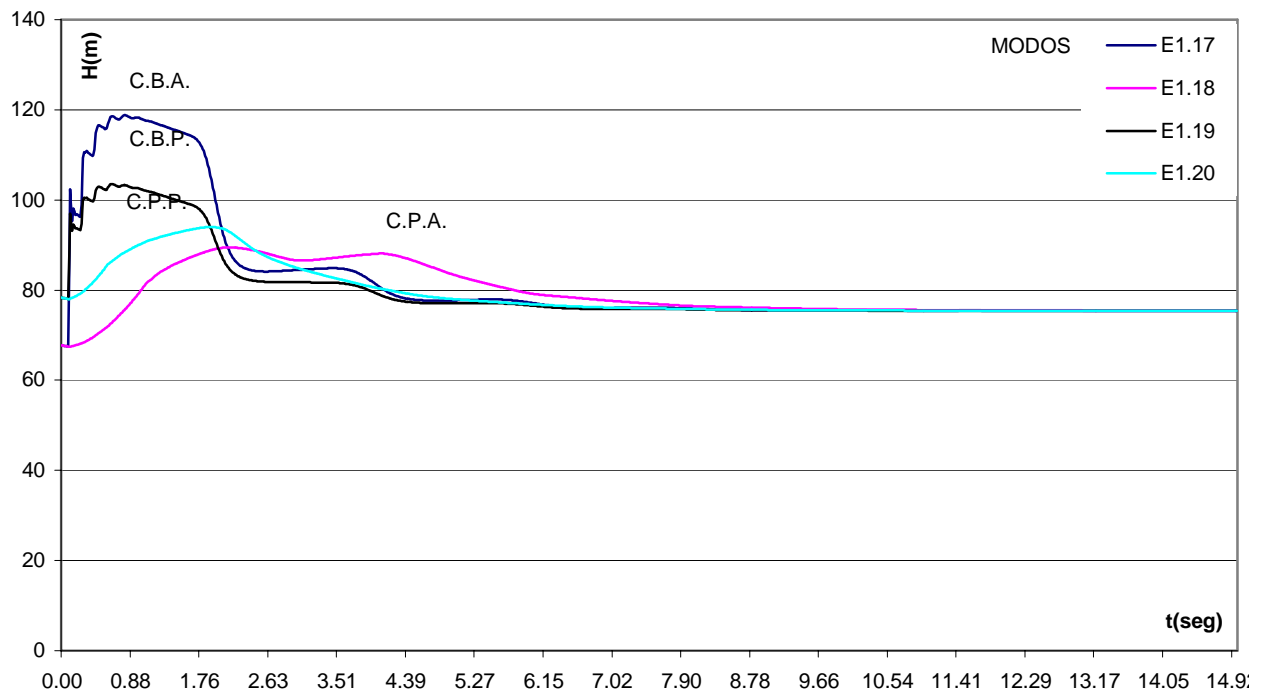


Gráfico No. IV.15.15: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas a y c totalmente abiertas)

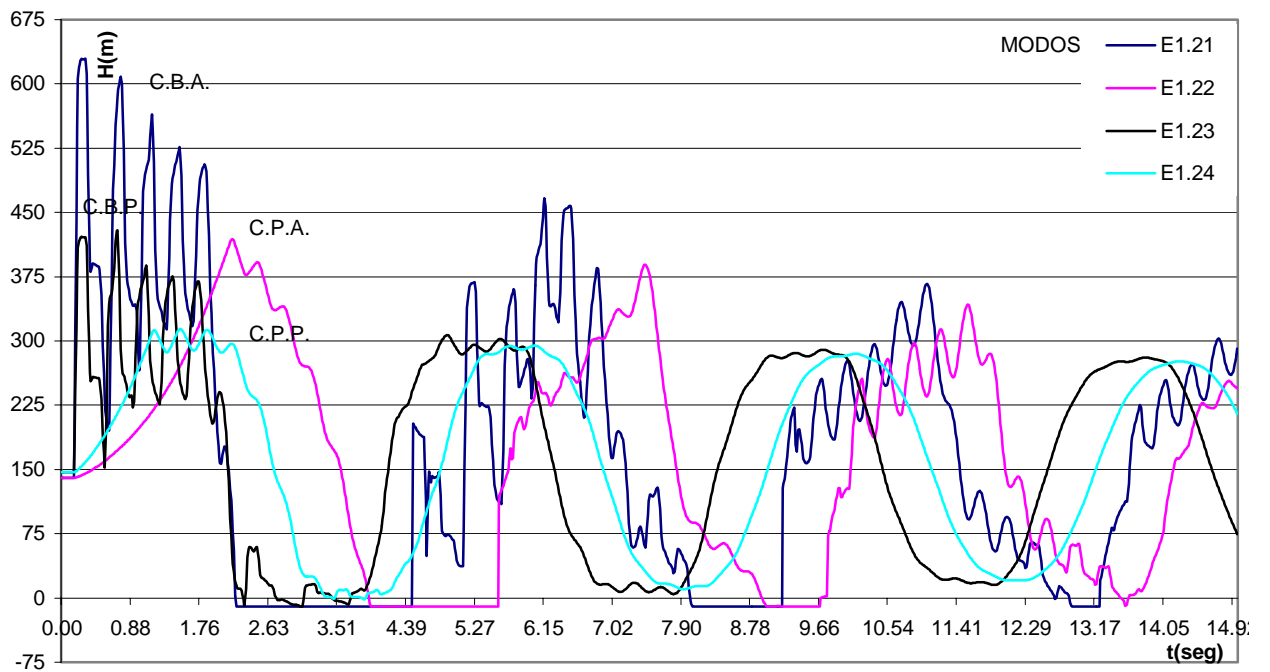


Gráfico No. IV.15.16: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas a y b totalmente cerradas)

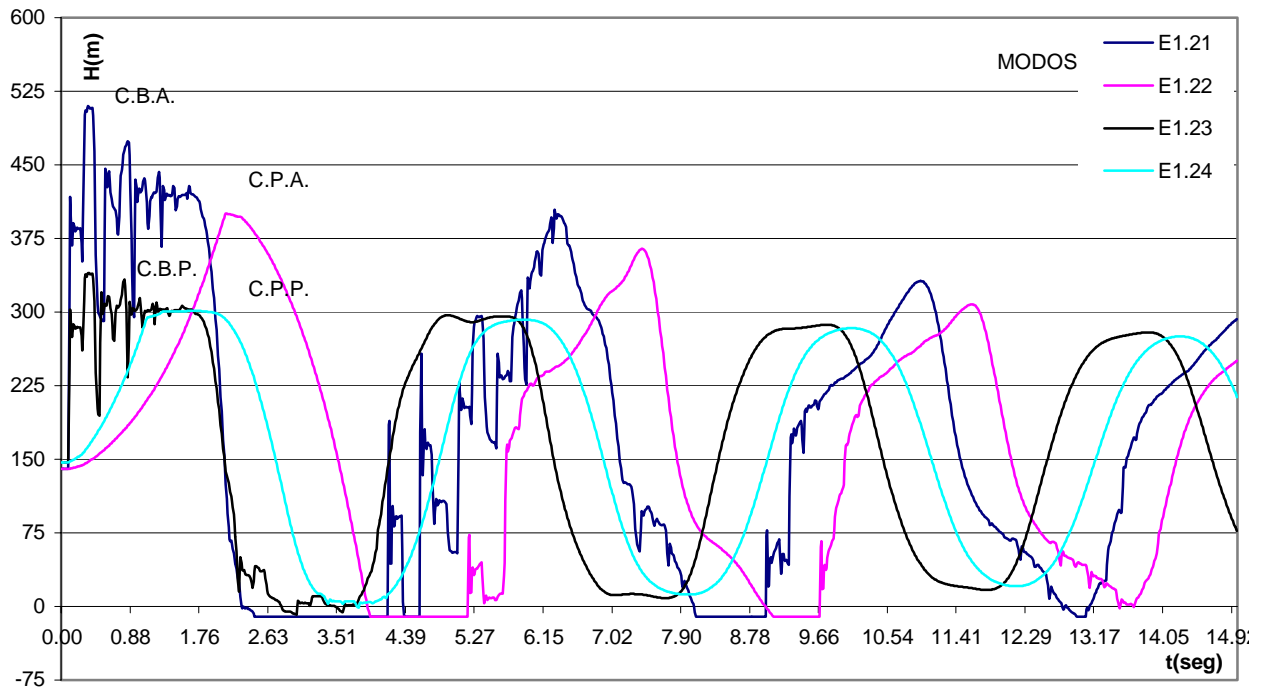


Gráfico No. IV.15.17: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas a y b totalmente cerradas)

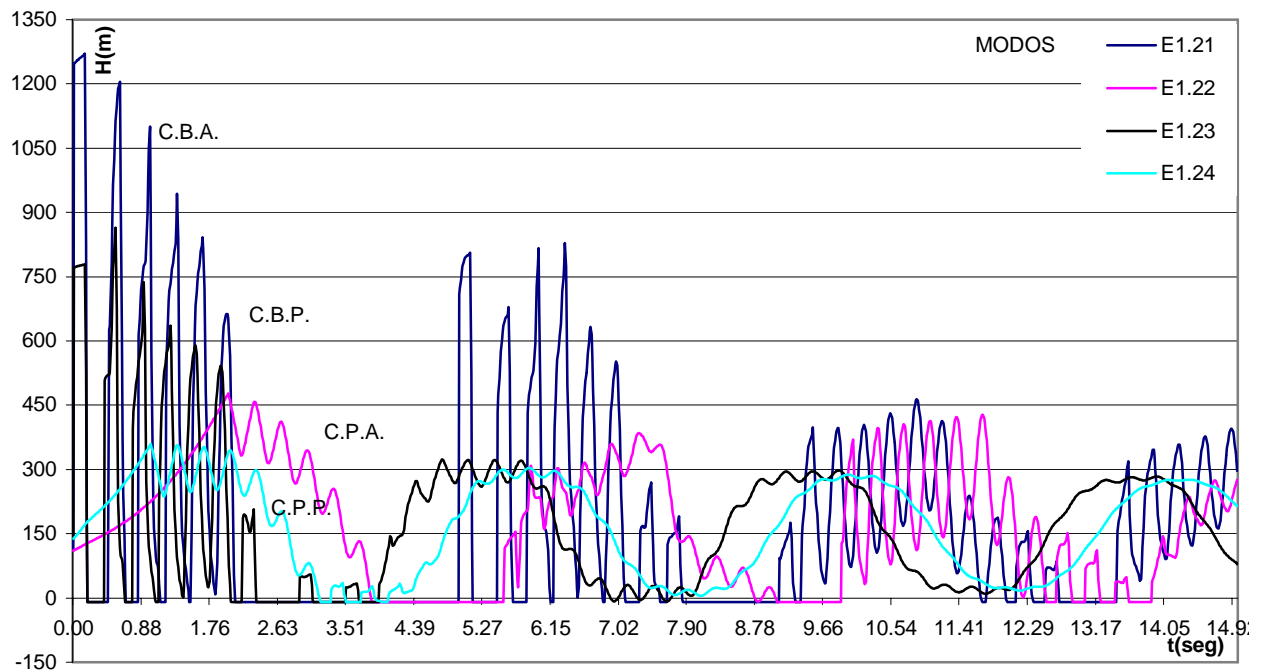


Gráfico No. IV.15.18: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas a y b totalmente cerradas)

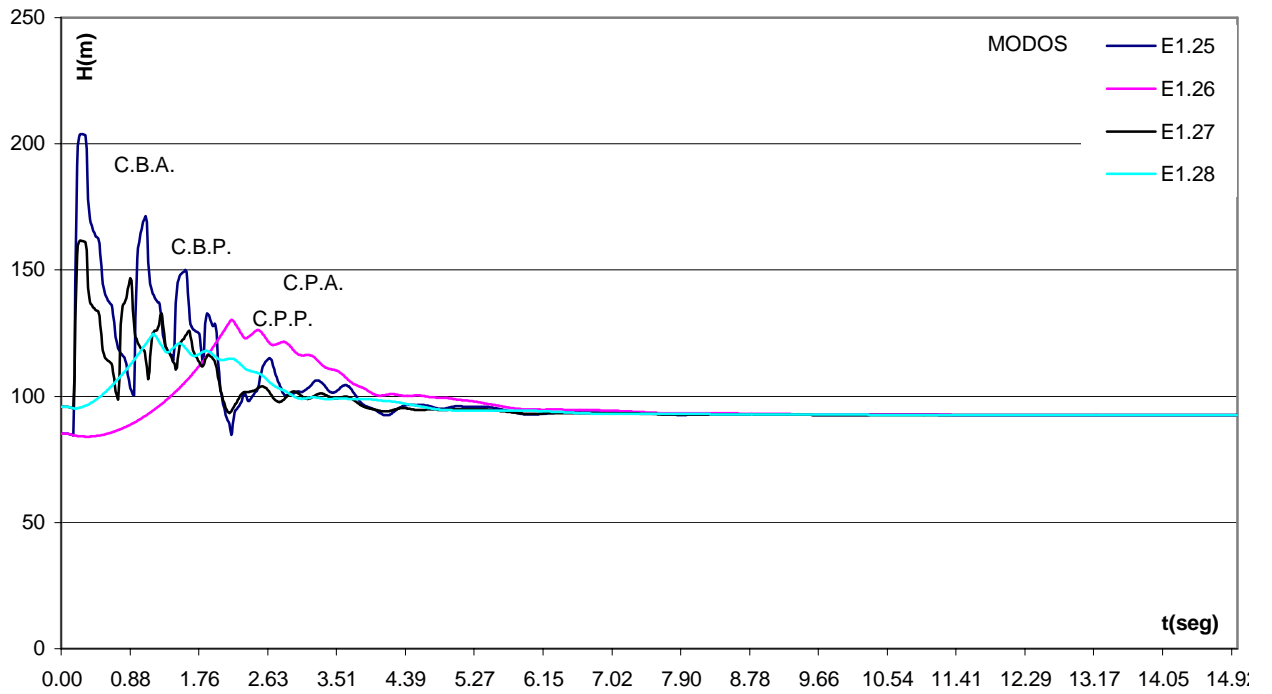


Gráfico No. IV.15.19: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvulas a y b totalmente abiertas)

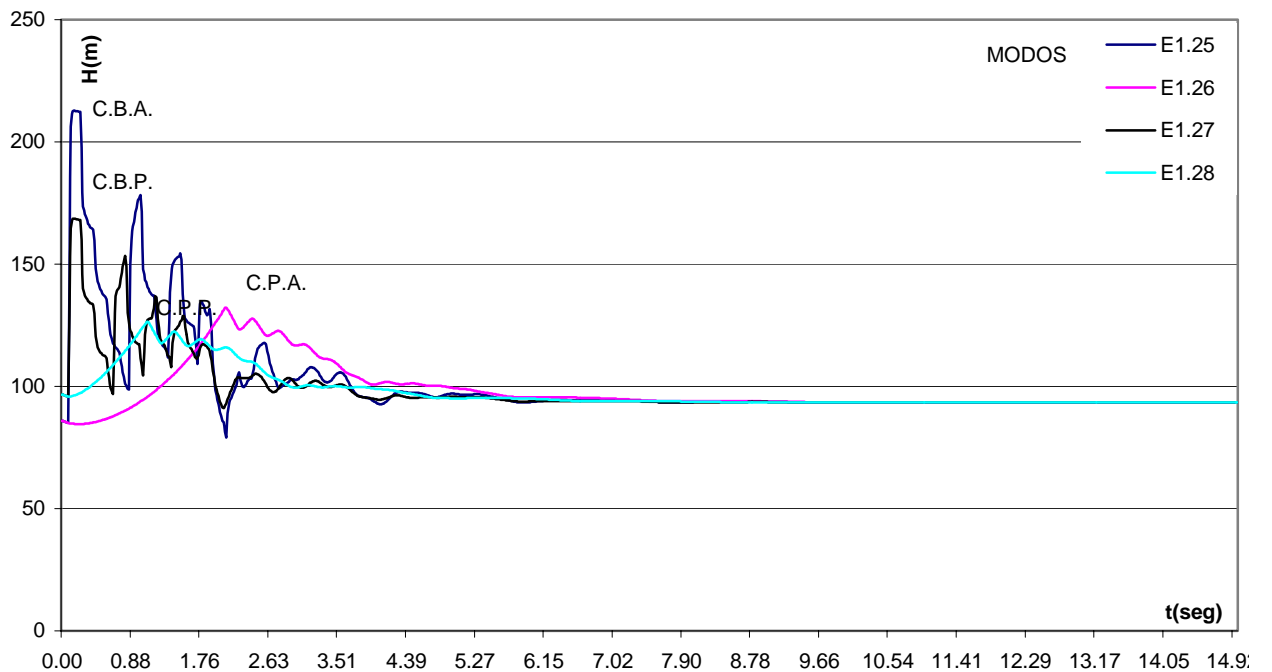


Gráfico No. IV.15.20: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvulas a y b totalmente abiertas)

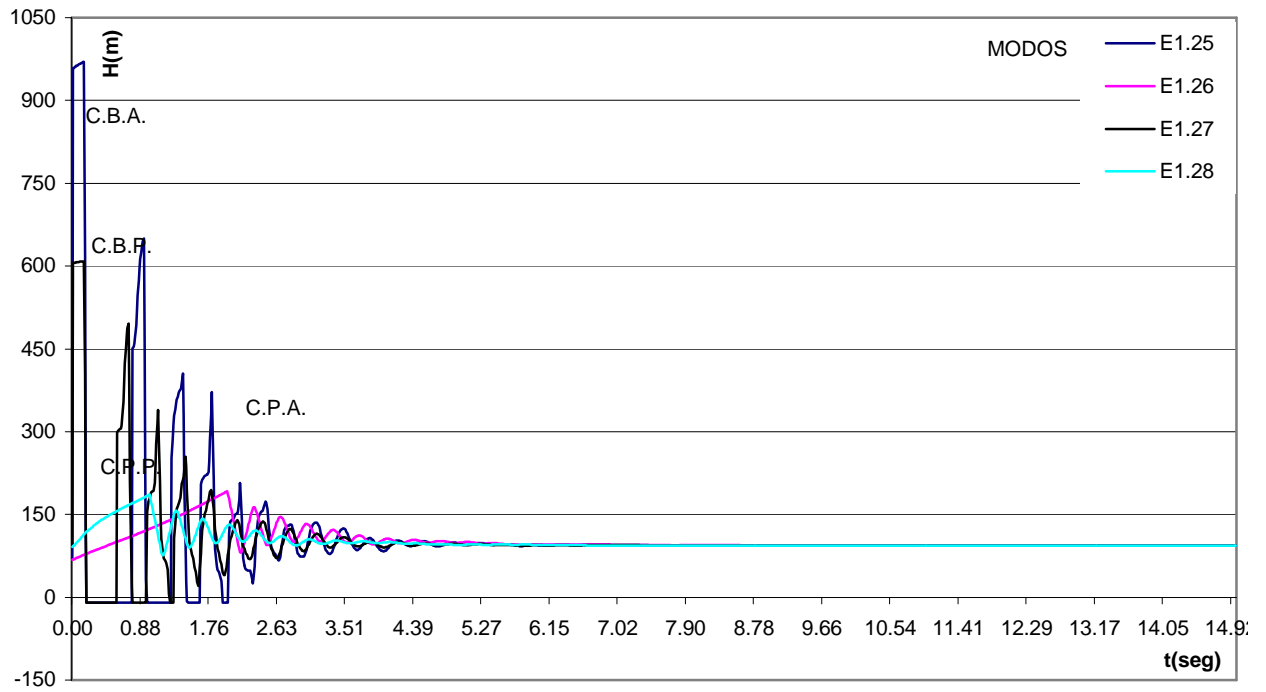


Gráfico No. IV.15.21: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvulas a y b totalmente abiertas)

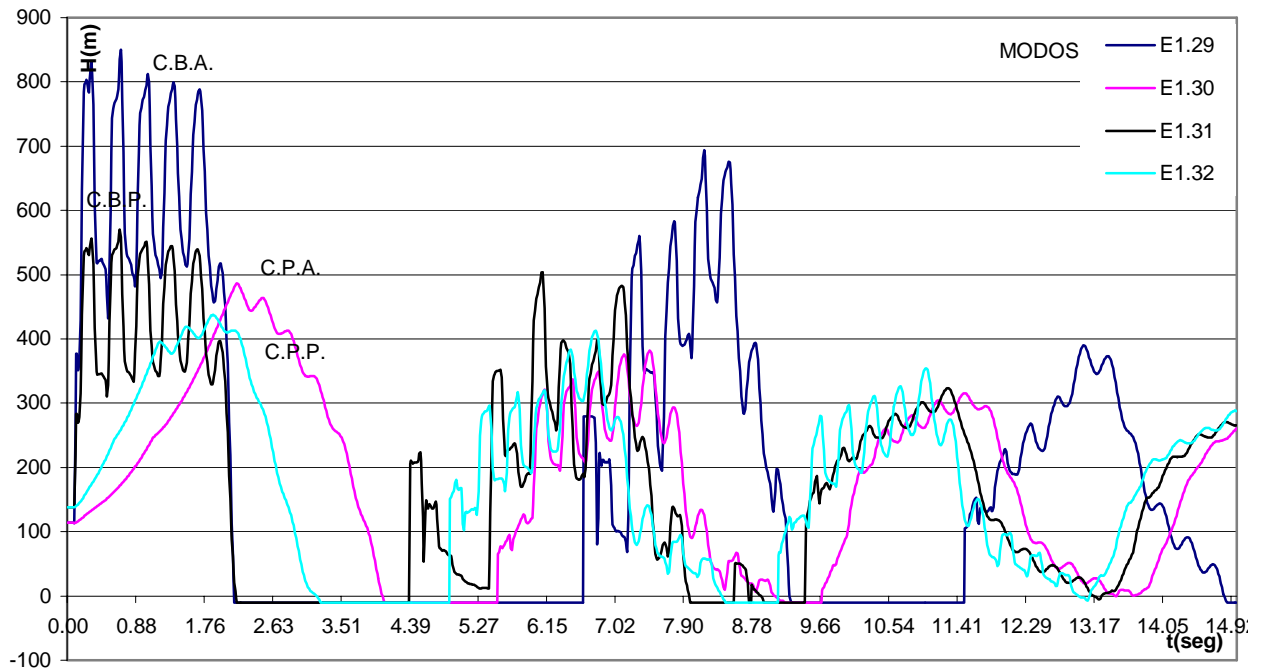


Gráfico No. IV.15.22: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula a totalmente cerrada)

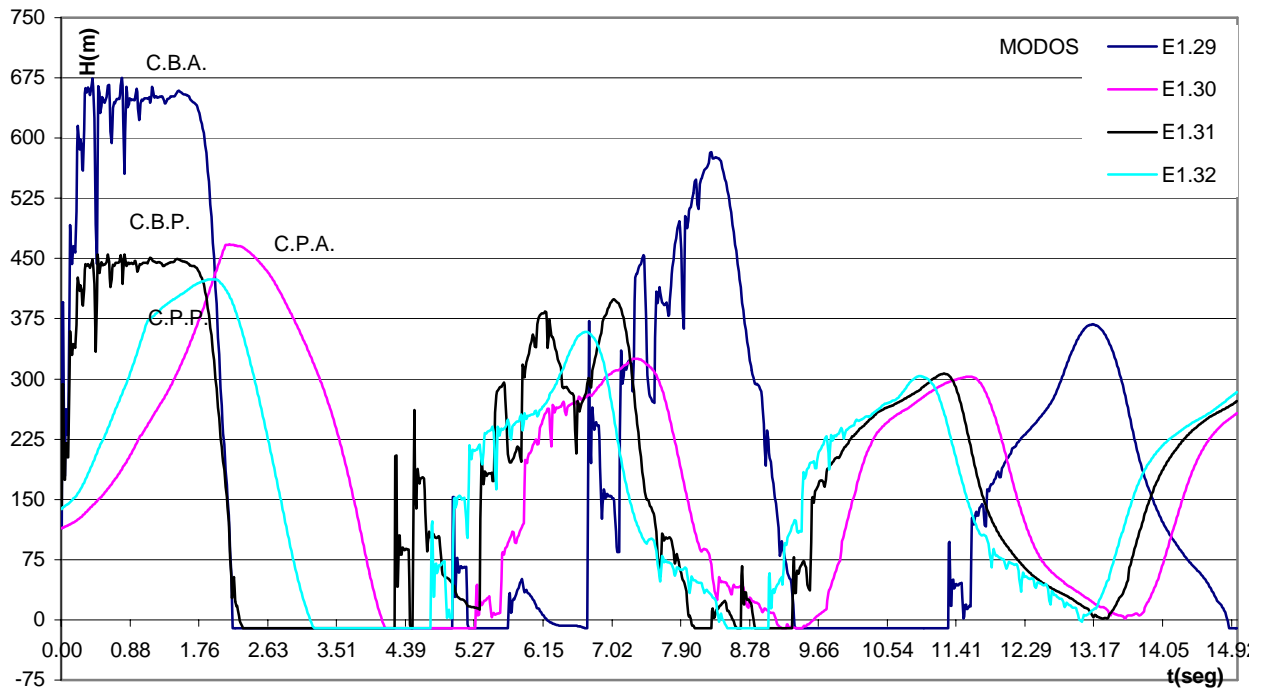


Gráfico No. IV.15.23: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula a totalmente cerrada)

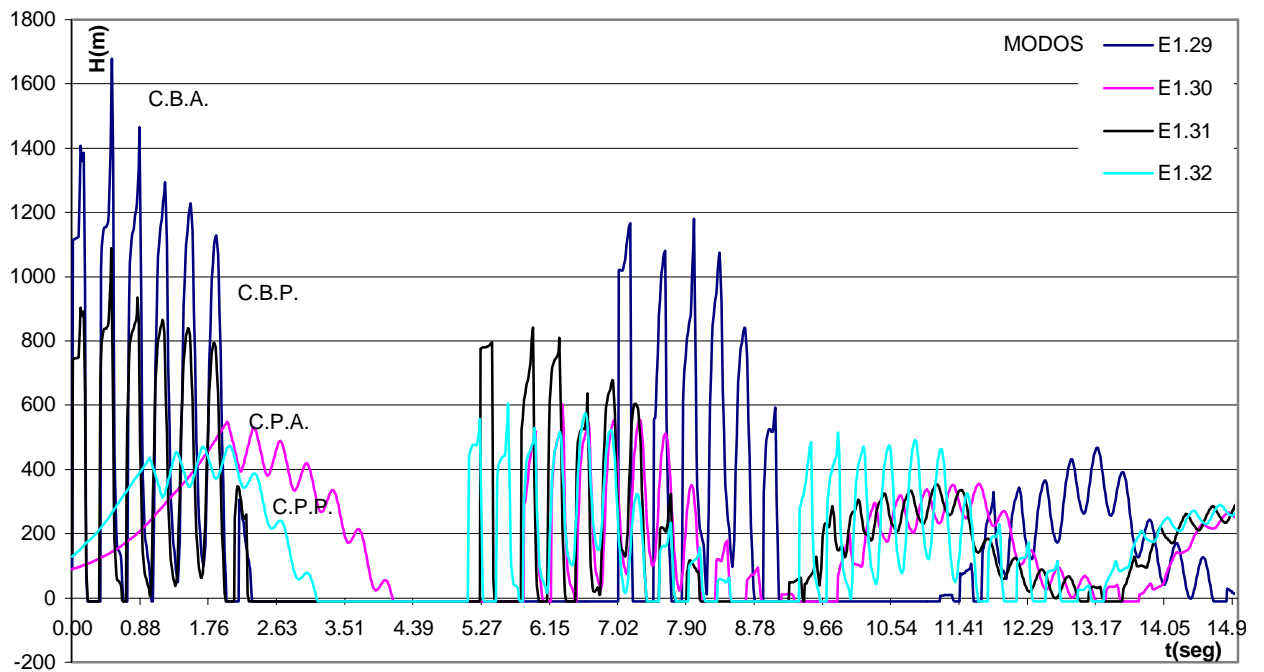


Gráfico No. IV.15.24: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula a totalmente cerrada)

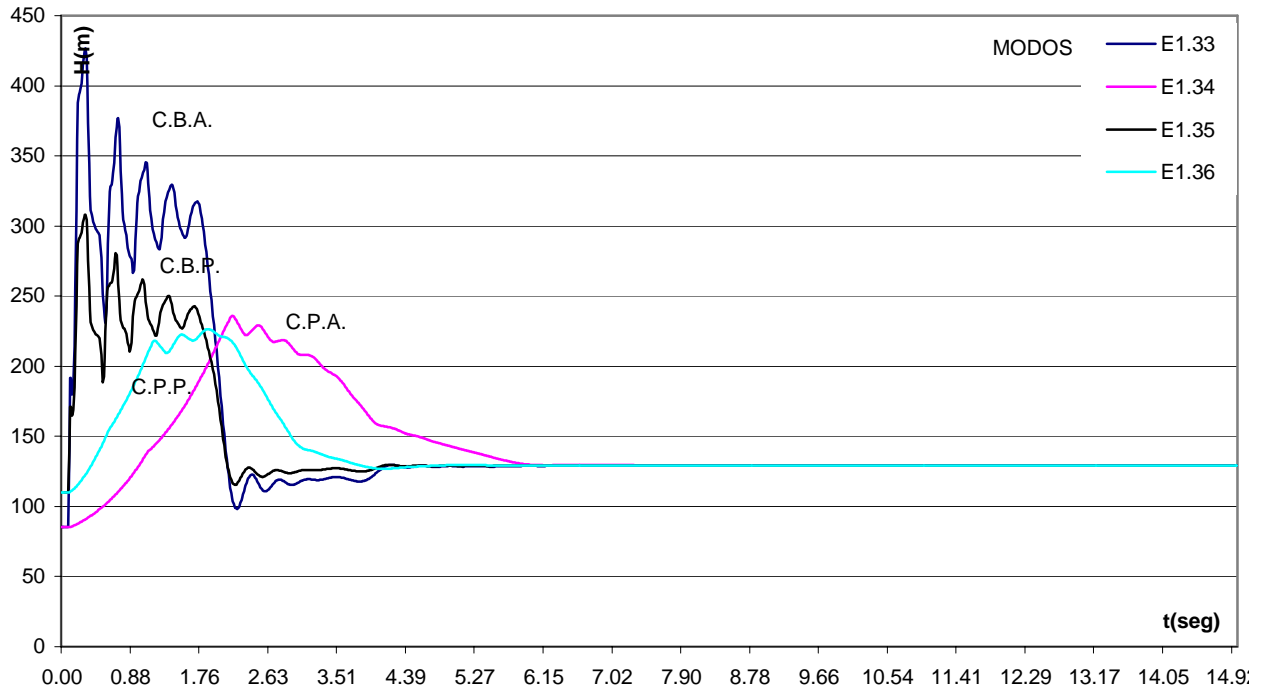


Gráfico No. IV.15.25: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula a totalmente abierta)

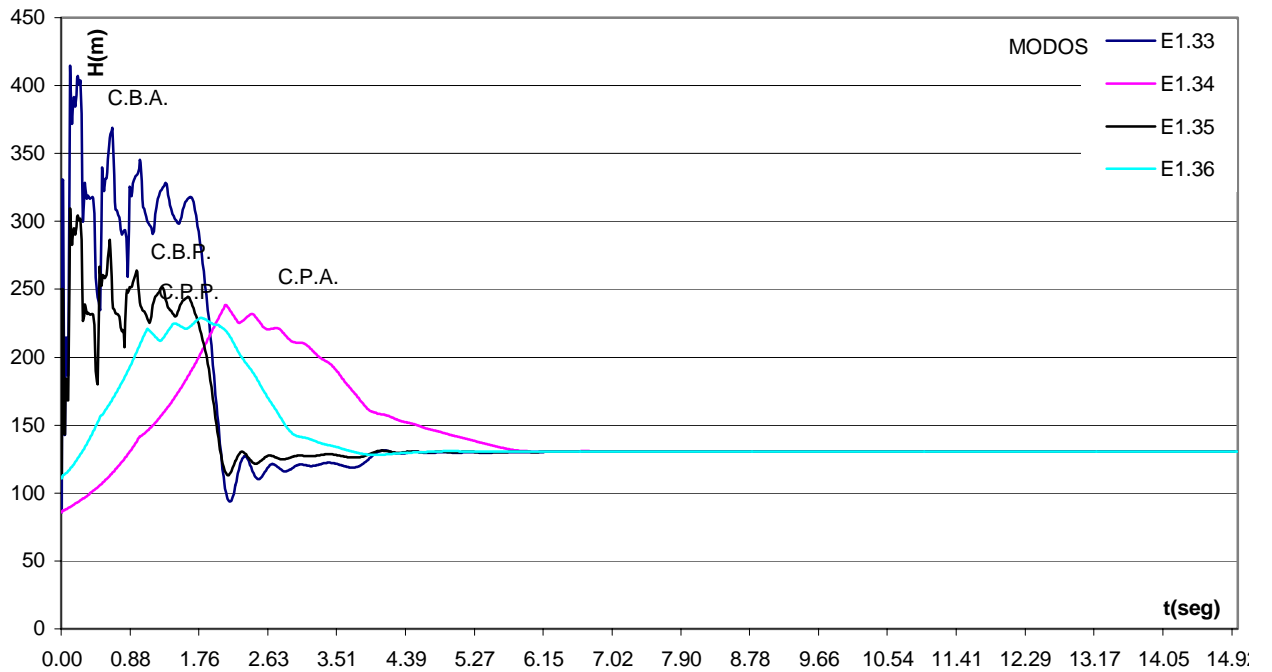


Gráfico No. IV.15.26: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula a totalmente abierta)

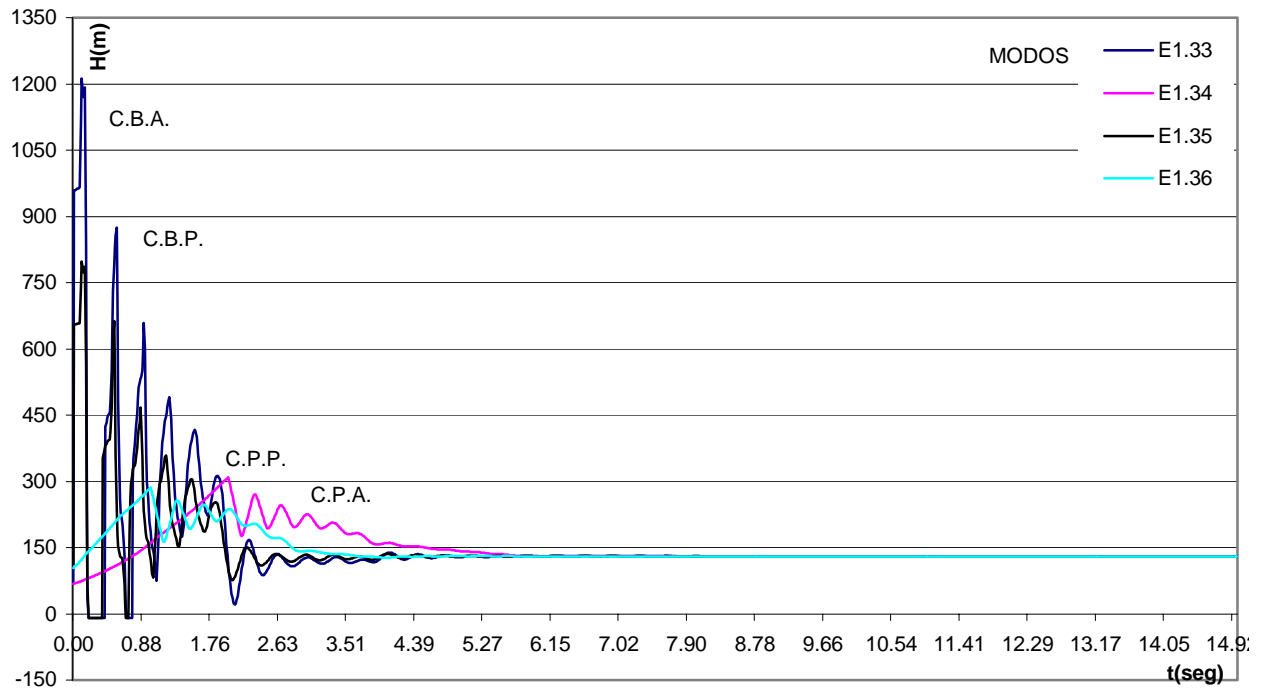


Gráfico No. IV.15.27: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula a totalmente abierta)

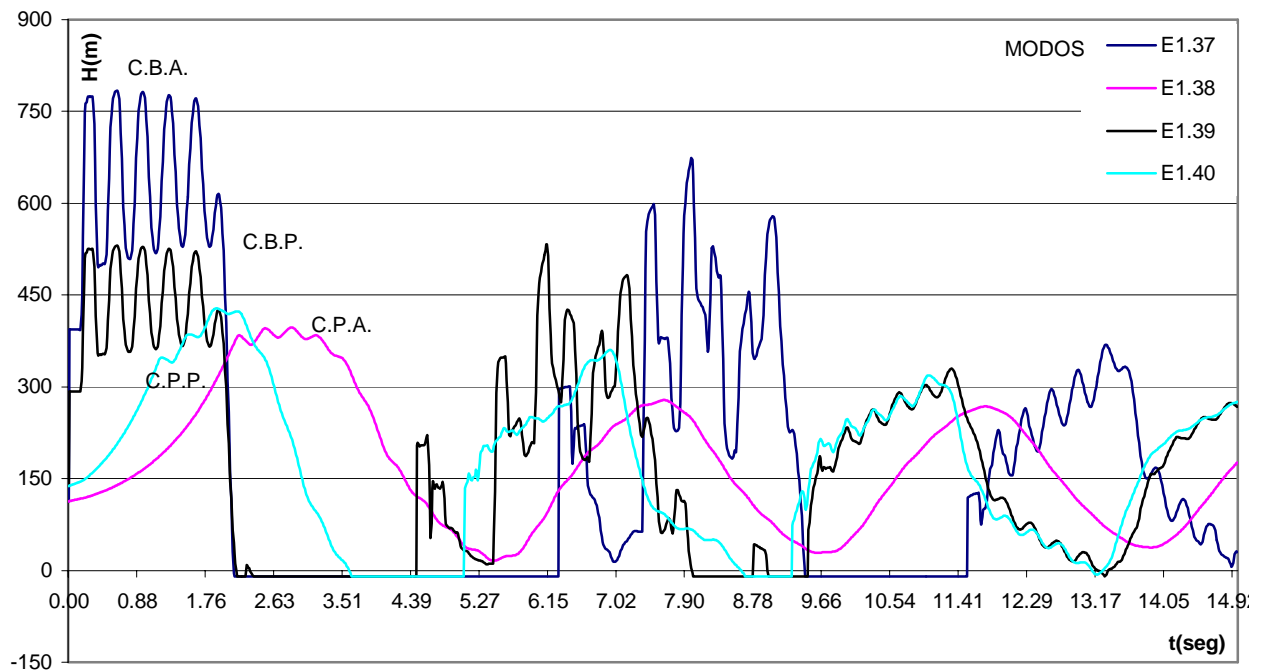


Gráfico No. IV.15.28: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula b totalmente cerrada)

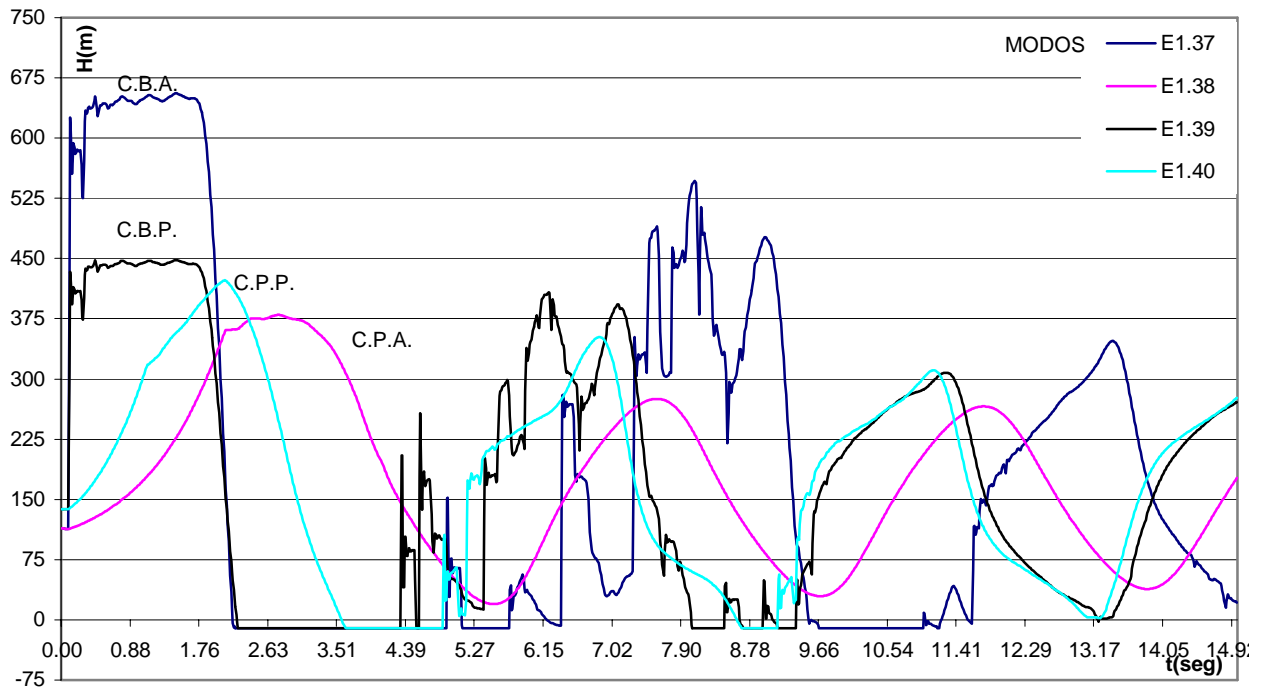


Gráfico No. IV.15.29: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula b totalmente cerrada)

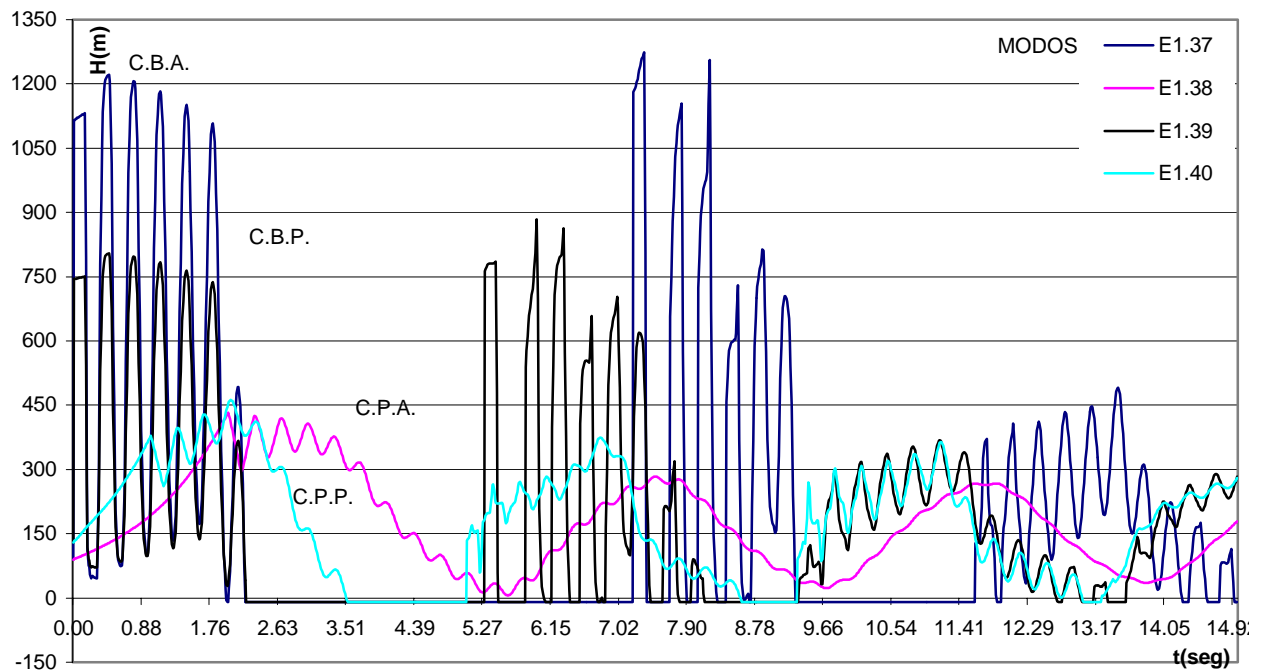


Gráfico No. IV.15.30: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula b totalmente cerrada)

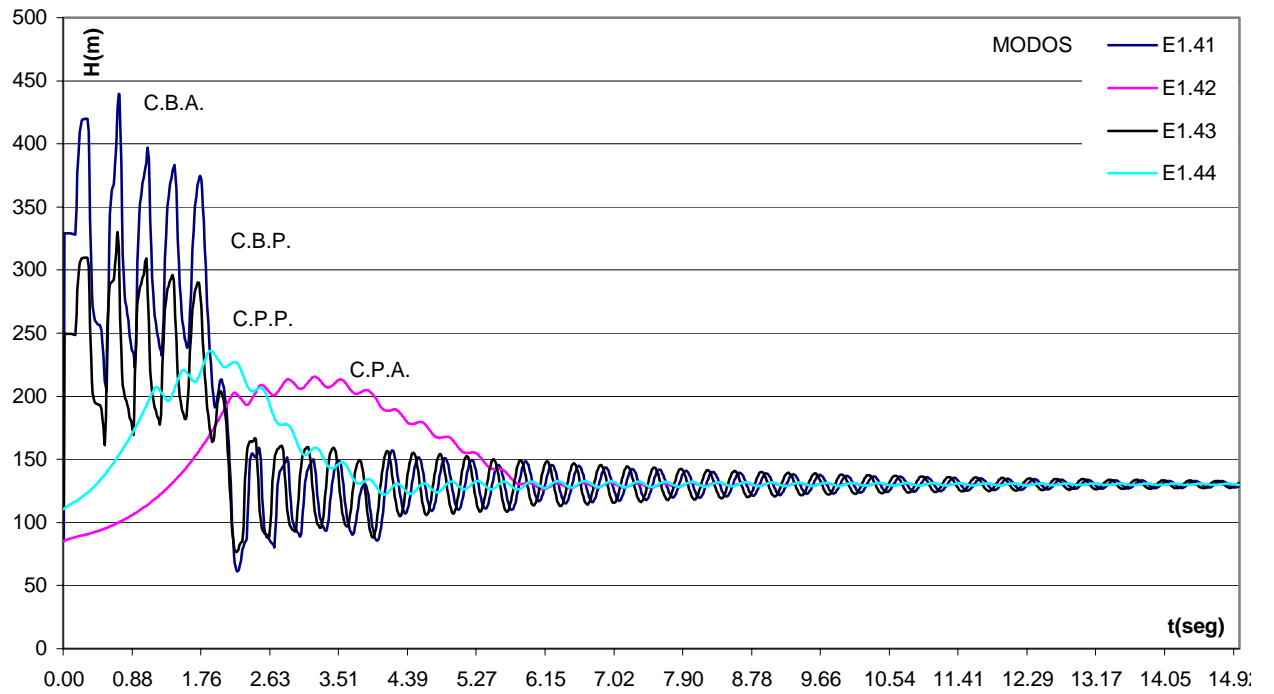


Gráfico No. IV.15.31: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula b totalmente abierta)

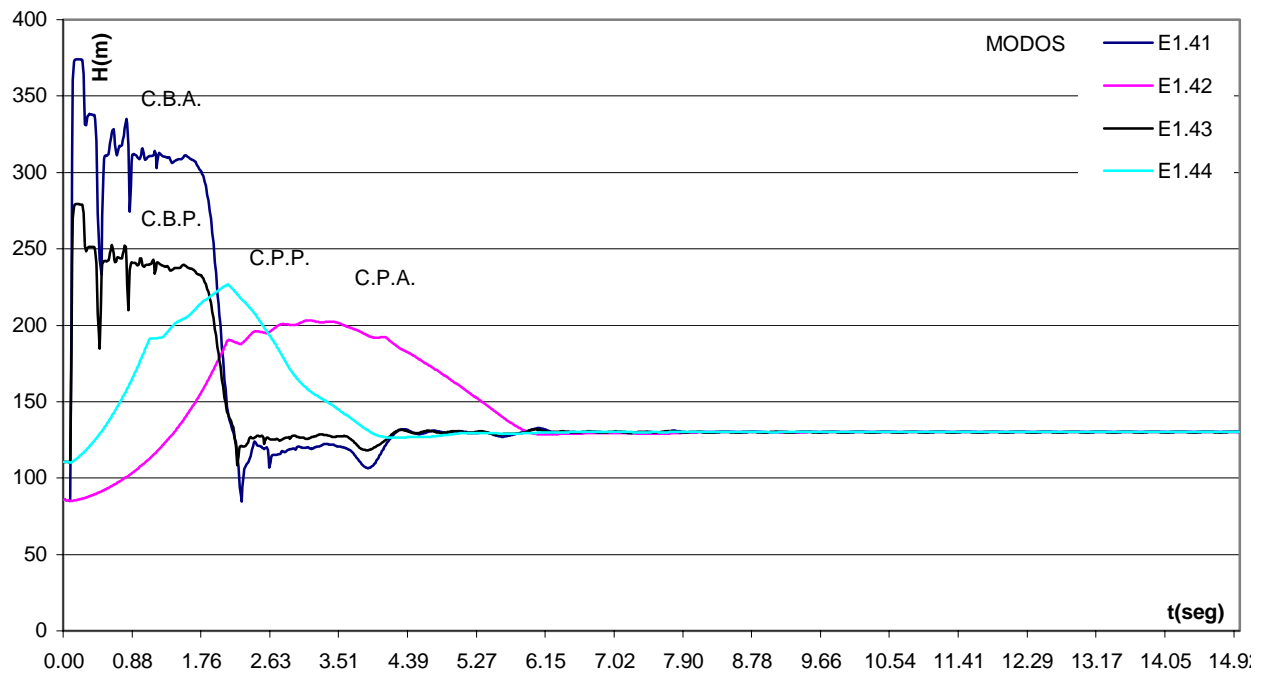


Gráfico No. IV.15.32: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula b totalmente abierta)

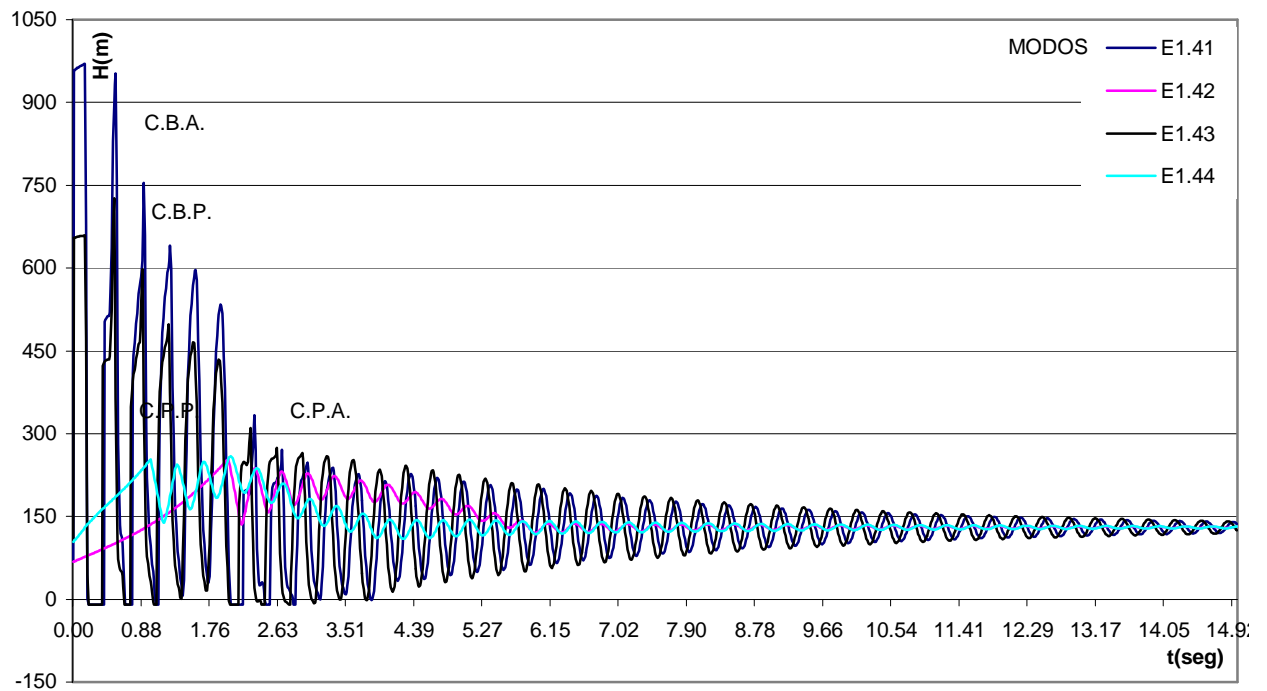


Gráfico No. IV.15.33: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula b totalmente abierta)

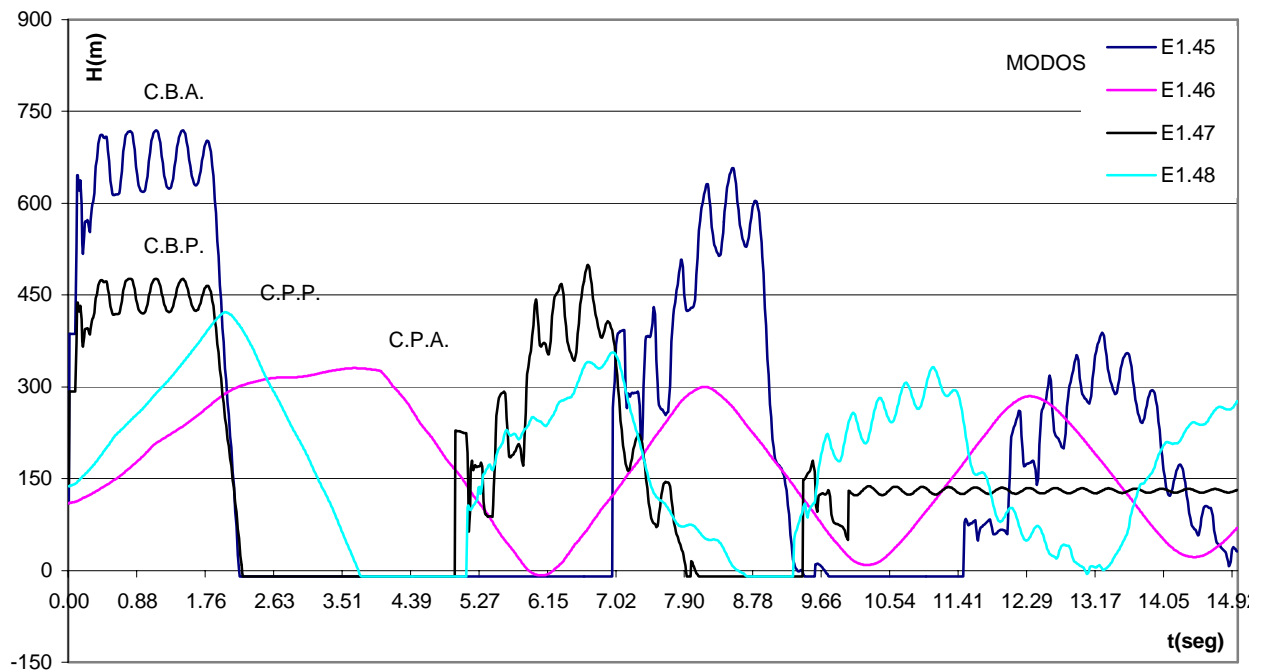


Gráfico No. IV.15.34: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula c totalmente cerrada)

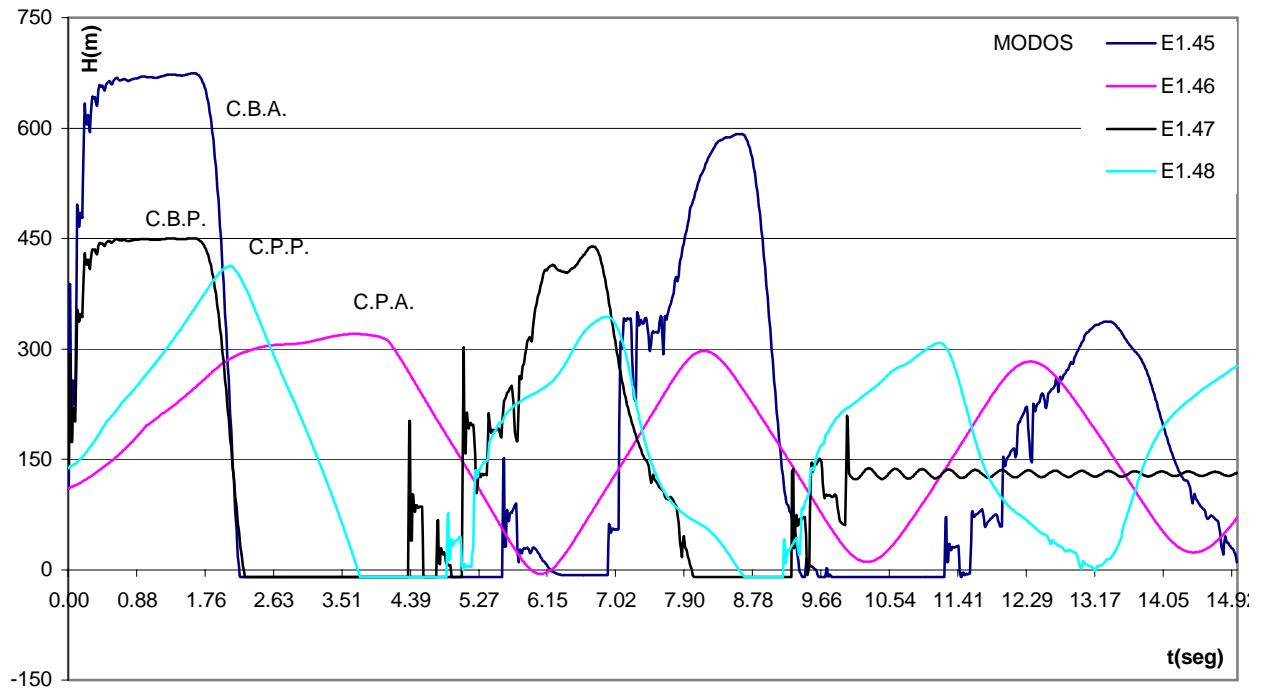


Gráfico No. IV.15.35: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula c totalmente cerrada)

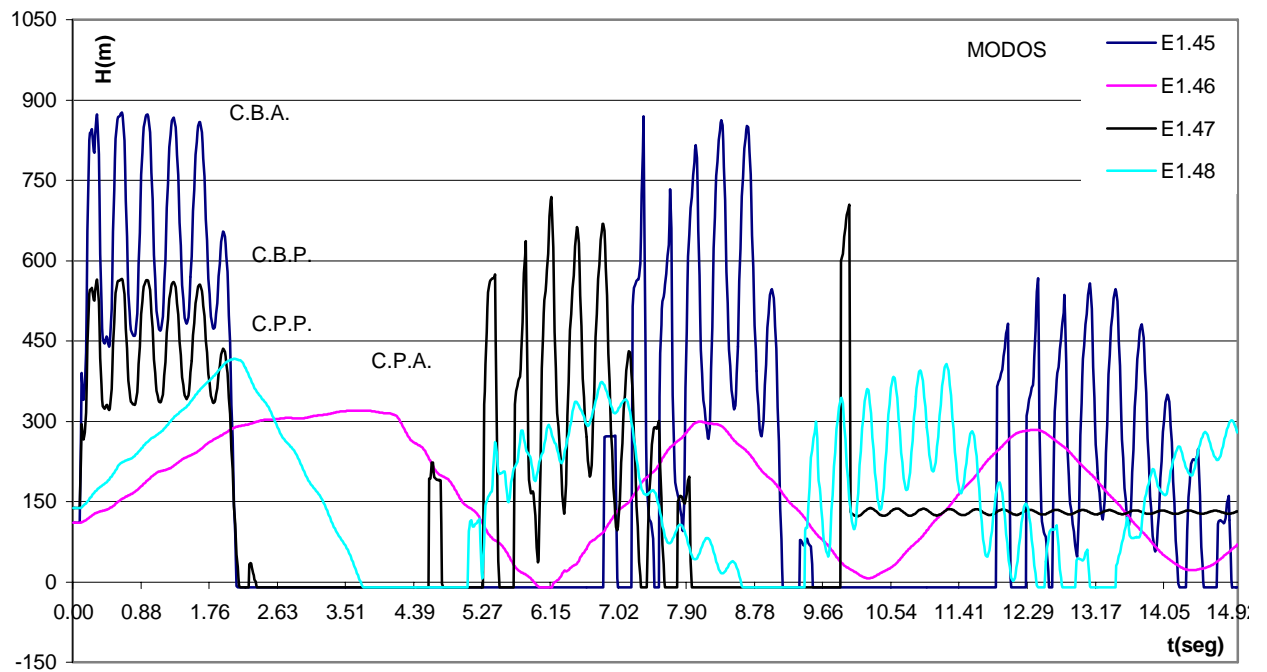


Gráfico No. IV.15.36: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula c totalmente cerrada)

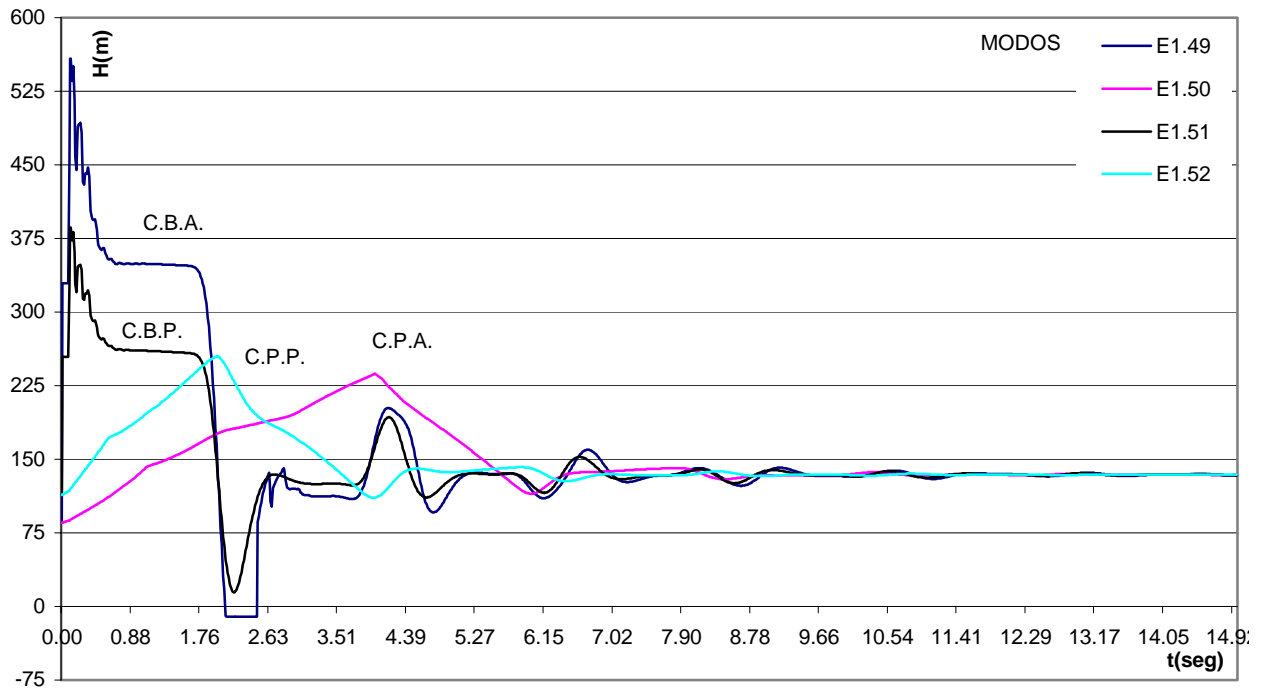


Gráfico No. IV.15.37: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula a (Válvula c totalmente abierta)

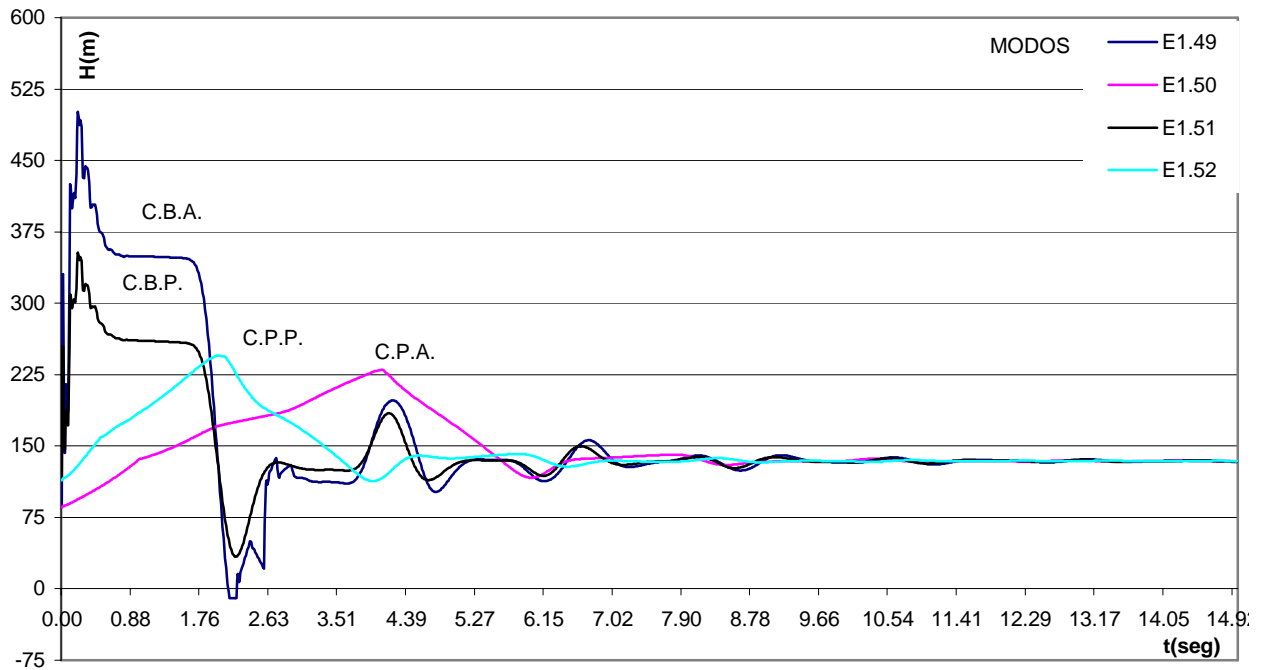


Gráfico No. IV.15.38: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula b (Válvula c totalmente abierta)

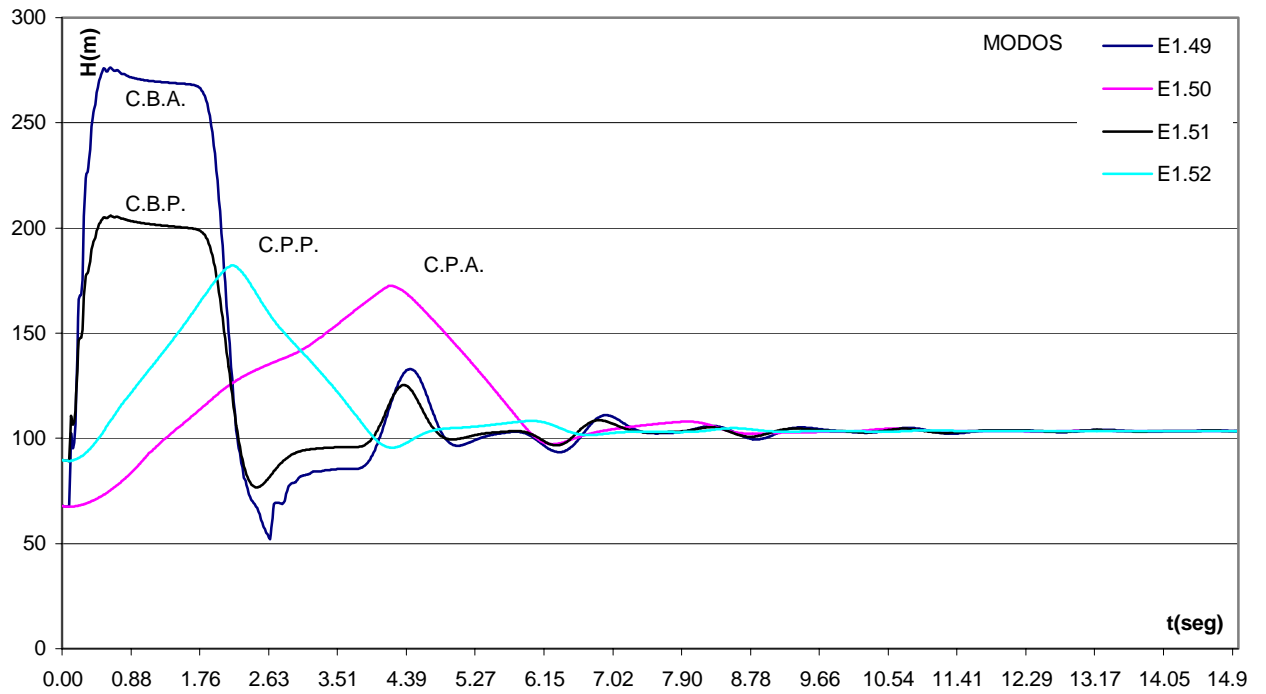


Gráfico No. IV.15.39: Esquema E.1 Variación de presión en la válvula c (Válvula c totalmente abierta)

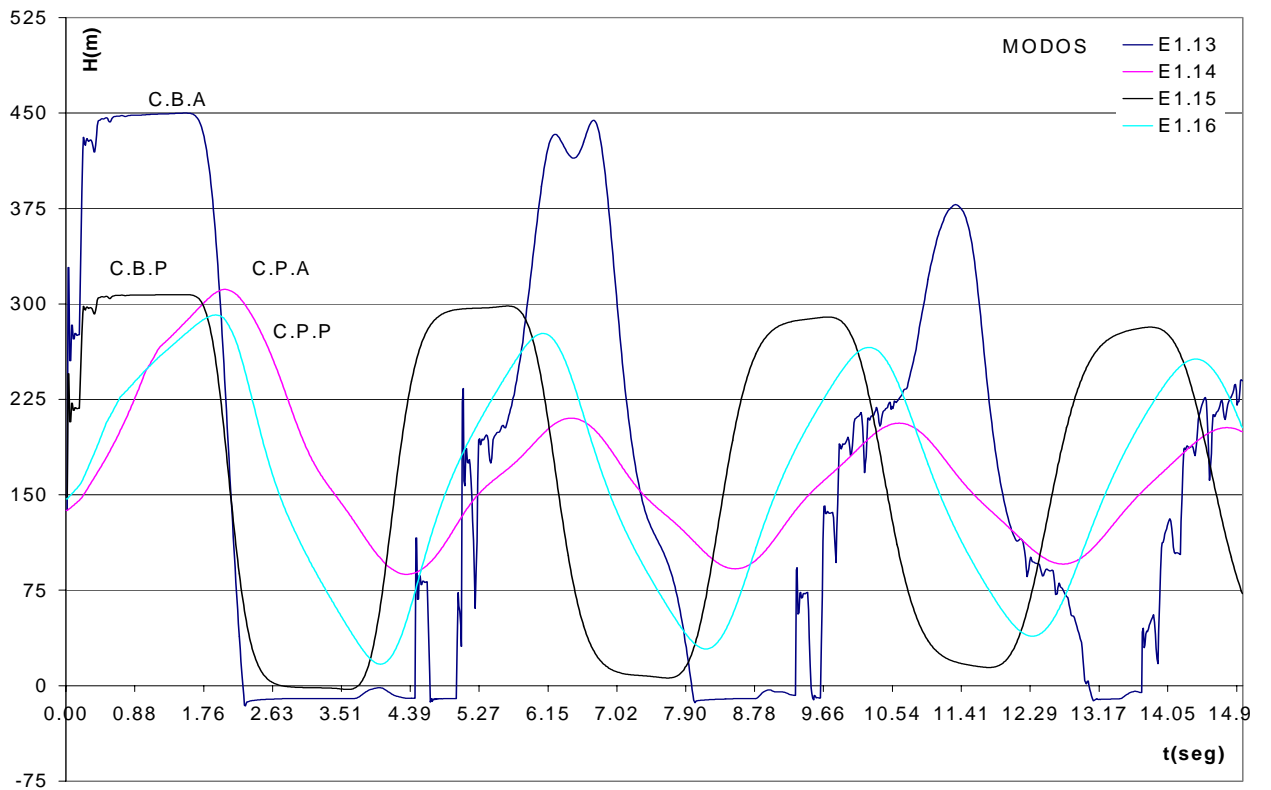


Gráfico No. IV.15.40: Esquema E.1 Variación de presión en el nodo de bifurcación (Válvulas a y c totalmente cerradas)

IV.15.3 Análisis de resultados caso E.1

Empecemos con las tres primeras gráficas No. IV.15.1, IV.15.2 y IV.15.3; que representan la variación de presión en las válvulas *a*, *b*, y *c* respectivamente, cuando todas las válvulas operan al mismo tiempo. Observando detalladamente las tres gráficas y apoyándonos en las tablas de datos de las gráficas podemos distinguir el primer pico de sobrepresión producido por el cierre de cada una de las válvulas y en donde todavía no se ve afectada por el resto del sistema ya que las ondas de presión comienzan a viajar aguas arriba, este intervalo realmente es muy pequeño ocasionado por las “cortas” longitudes de los ramales. A partir de este momento en que las ondas de presión comienzan a llegar al nodo de unión, se ve como empiezan a afectarse cada una de ellas incrementando la sobrepresión de una manera considerable. En cada válvula podemos apreciar un comportamiento distinto en los picos de sobrepresión ya que para cada caso los ciclos de sobrepresiones y depresiones ocasionados por el ramal se solapan de maneras distintas con los ciclos de sobrepresión de la tubería principal, observándose por ejemplo en el caso de la válvula *c*, un comportamiento muy marcado de los ciclos debido a una velocidad de onda mayor (mayor sobrepresión) con respecto al ramal de la válvula *a* y a un período de oscilación mayor (longitud mayor) con respecto al ramal de la válvula *b*. Esta característica sería una de las principales diferencias respecto al caso C.1 además de alcanzar sobrepresiones mucho mayores en magnitud. De manera general también se observa en las tres gráficas un comportamiento cíclico de las sobrepresiones ya que la tubería principal ejerce gran influencia en el comportamiento del sistema, aspecto que no ocurría en el caso C.1.

En la gráfica No. IV.15.3 se puede apreciar nuevamente el efecto negativo de los fenómenos de reflexión y transmisión de ondas de presión en el nodo de unión, al alcanzar

presiones mayores mucho después del primer intervalo de tiempo. Para apreciar mejor este fenómeno se puede ver la tabla No. IV.15.3 donde comparamos las presiones obtenidas por el método de las características y las presiones calculadas por la ecuación de Joukowsky siendo estas últimas mucho menores, a pesar de no ser compatibles los resultados nos da una idea del efecto de los ramales en la sobrepresiones.

A continuación analizaremos los modos de operación cuando dos de las válvulas se encuentran totalmente cerradas. Las gráficas correspondientes son las siguientes:

- IV.15.4, IV.15.5 y IV.15.6 (válvulas *b* y *c* totalmente cerradas).
- IV.15.10, IV.15.11 y IV.15.12 (válvulas *a* y *c* totalmente cerradas).
- IV.15.16, IV.15.17 y IV.15.18 (válvulas *a* y *b* totalmente cerradas).

Primero de manera general se observa en las nueve gráficas un comportamiento cíclico de las sobrepresiones con mayor claridad con respecto a lo observado en las gráficas No. IV.15.1, IV.15.2 y IV.15.3. También se observa que para los modos de cierre progresivo, el comportamiento en general del sistema no se muy afectado por los efectos de superposición de ondas de presión.

Ahora analizando cada gráfica en particular se tiene que el comportamiento de cada una de ellas depende claramente a las características de cada ramal y a su vez al ramal activo en cada caso. Específicamente cuando el único ramal activo es el perteneciente a la válvula *c* (gráficas No. IV.15.16, IV.15.17 y IV.15.18) se observa como influye las ondas generadas en ese ramal sobre los otros ramales, en este caso al tener los ciclos de sobrepresión y depresión con una amplitud mayor de onda. Y en el caso contrario cuando el ramal activo es el perteneciente a la válvula *b* (gráficas No. IV.15.10, IV.15.11 y IV.15.12) donde se observa la poca influencia de esta sobre el resto de los ramales. Observando la tabla No.IV.15.3 para los modos E1.5, E1.13, E1.21 se observa en este caso poca influencia de

los ramales inactivos en la magnitud de la sobrepresión generada con respecto a la sobrepresión calculada por Joukowsky, solo en el caso E1.5 (ramal activo válvula *a*) las presiones generadas en el sistema específicamente en el ramal de la válvula *c*, superan de manera significativa la sobrepresión calculada por la fórmula de Joukowsky. Y si se compara las sobrepresiones obtenidas en las nueve gráficas con respecto a las obtenidas en las gráficas No. IV.15.1, IV.15.2 y IV.15.3 para cada gráfica correspondiente, las sobrepresiones obtenidas con dos ramales inactivos no superan a las obtenidas cuando todas las válvulas operan.

Ahora analizaremos los modos de operación cuando dos de las válvulas se encuentran totalmente abiertas. Las gráficas correspondientes son las siguientes:

- IV.15.7, IV.15.8 y IV.15.9 (válvulas *b* y *c* totalmente abiertas).
- IV.15.13, IV.15.14 y IV.15.15 (válvulas *a* y *c* totalmente abiertas).
- IV.15.19, IV.15.20 y IV.15.21 (válvulas *a* y *b* totalmente abiertas).

Primero, de manera general se observan en las gráficas una rápida atenuación de las sobrepresiones originadas en el ramal de operación, en comparación con el caso C.1 la atenuación es mucho más rápida de hecho en ninguno de los casos se da la probabilidad que ocurra separación de columna líquida en el ramal de la válvula cerrada. Ahora comparando los tres casos tenemos, se puede observar que el ramal de la válvula *c* es el ramal más crítico debido que para este se producen las mayores sobrepresiones en magnitud además el sistema tarda más en atenuar dichas sobrepresiones, inclusive en los gráficos No. IV.15.19, IV.15.20 y IV.15.21 se observa el comportamiento cíclico de la sobrepresiones y depresiones producidas. Por otro lado si se observa detenidamente las gráficas No. IV.15.7 y IV.15.14 se observa que en los modos de cierre brusco de las válvulas *a* y *b* el comportamiento es muy similar, teniendo como diferencia el período de oscilación de la

onda, regido por la diferencia de longitud entre las tuberías y con respecto a los modos de cierre progresivo observamos que la ley de cierre en forma x^n origina sobrepresiones menores con respecto a la ley de cierre lineal.

Analizando las nueve gráficas cabe destacar que el ramal perteneciente a la válvula *c*, es el ramal que tarda más en estabilizarse sin importar cual válvula este operando, ocasionado por los parámetros geométricos del mismo.

Para finalizar se puede observar en todas las gráficas como tienden a estabilizarse a su estado estacionario.

Ahora consideraremos los modos de operación cuando una de las válvulas se encuentra totalmente cerrada. Las gráficas correspondientes son las siguientes:

- IV.15.22, IV.15.23 y IV.15.24 (válvula *a* totalmente cerrada).
- IV.15.28, IV.15.29 y IV.15.30 (válvula *b* totalmente cerrada).
- IV.15.34, IV.15.35 y IV.15.36 (válvula *c* totalmente cerrada).

Para este caso se observa que las sobrepresiones en general son menores a las generadas en los gráficos No. IV.15.1, IV.15.2 y IV.15.3, mostrando que la influencia de los ramales inactivos depende de muchos parámetros.

Estudiando las nueve gráficas se observa nuevamente la influencia de cada ramal en el comportamiento de las sobrepresiones del sistema, de hecho si se dibuja una envolvente sobre los picos de presión generados en cada caso, realmente se vería un comportamiento muy similar entre ellas ya que aparecieran los ciclos de sobrepresión originados por la tubería principal. Solo que en cada caso la magnitud difiere debido a los diferentes parámetros geométricos para cada ramal. Una de las principales diferencias de este caso con respecto al caso C.1, consiste en que la influencia de los ramales “cortos” tiene que ver mucho con la aparición de muchos picos de presión debido al corto período de oscilación

de los mismos, pero no afectan gravemente la magnitud de la onda de presión principal originada por la tubería principal, situación que ocurre en los casos de ramales “largos”.

Por último llama la atención el comportamiento del modo E1.47 (gráficas No. IV.15.34, IV.15.35 y IV.15.36) a partir de los 9 seg aproximadamente, ya que luego de tener los picos de sobrepresiones bruscamente se atenúan las mismas tendiendo a su estado estacionario con unos pequeños ciclos de variación de presión, se puede pensar que luego de las reflexiones y transmisiones de ondas, las ondas coincidieron en su período de oscilación pero con valores en magnitud contrarios, de esta manera anulándose entre ellas y quedando solo una pequeña perturbación.

Finalizando con el caso E.1 analizaremos el grupo de gráficos que representan el modo de operación con una sola válvula abierta. Dichos gráficos son los siguientes:

- IV.15.25, IV.15.26 y IV.15.27 (válvula *a* totalmente abierta).
- IV.15.31, IV.15.32 y IV.15.33 (válvula *b* totalmente abierta).
- IV.15.37, IV.15.38 y IV.15.39 (válvula *c* totalmente abierta).

El comportamiento general de este grupo de gráficos es la atenuación de las sobrepresiones, por supuesto de nuevo la atenuación es considerablemente más lenta que en los casos con dos válvulas abiertas ya que la cantidad de energía de presión transformada en energía cinética es menor.

Estudiando estas nuevas gráficas se observa que las atenuaciones mayores ocurren cuando el ramal de la válvula *a* esta abierta y las menores atenuaciones cuando el ramal de la válvula *b* esta abierta. Uno de los factores que origina este comportamiento tiene que ver con la resistencia de la tubería. El ramal de la válvula *a* es más corto en longitud que el ramal de la válvula *b* y el ramal de la válvula *c* es de menor diámetro que el ramal de la válvula *a*.

En las gráficas No. IV.15.31 y IV.15.33 observamos una atenuación del tipo sinusoidal, que no se observa en el resto de las gráficas debido a lo rápido de la atenuación.

A pesar de la rápida atenuación ocurrida se sigue observando en algunas gráficas el fenómeno de separación de la columna líquida, pero menor magnitud y ocurrencia con respecto al caso C.1 ya que también las atenuaciones en este caso son más rápidas.

Por último se puede verificar de acuerdo a la presión admisible de trabajo (norma B16.5) que los siguientes modos de operación fallarían: E1.1, E1.3, E1.4, E1.5, E1.13, E1.21, E1.23, E1.25, E1.27, E1.29, E1.30, E1.31, E1.32, E1.33, E1.35, E1.37, E1.39, E1.41, E1.43, E1.45, E1.47, E1.49.

En este caso seleccionaremos el modo E1.1 para estudiar los casos E.2 y E.3, por ser el modo más crítico.

Tabla No. IV.15.3: Caso E.1 Alturas máximas obtenidas en las válvulas.

Modos	H_{am}(m)	H_{ajou}(m)	H_{bm}(m)	H_{bjou}(m)	H_{cm}(m)	H_{cjou}(m)
E1.1	917.56	328.92	809.38	330.43	1764.79	956.65
E1.2	426.28	328.92	408.82	330.43	440.17	956.65
E1.3	649.29	272.59	571.17	272.96	1444.88	702.48
E1.4	528.56	272.59	524.02	272.96	568	702.48
E1.5	507.68	445.14	450.51	0.00	756.76	0.00
E1.6	270.29	445.14	260.69	0.00	260.87	0.00
E1.7	337.26	306.12	308.30	0.00	433.31	0.00
E1.8	299.01	306.12	294.70	0.00	298.84	0.00
E1.9	329.25	328.92	230.91	330.43	118.75	956.65
E1.10	129.35	328.92	123.84	330.43	92.46	956.65
E1.11	230.59	230.45	175.65	362.06	103.61	1033.69
E1.12	130.57	230.45	124.78	362.06	93.03	1033.69
E1.13	464.23	0.00	449.98	447.09	564.28	0.00
E1.14	312.98	0.00	312.24	447.09	312.97	0.00
E1.15	308.58	0.00	307.31	306.52	314.76	0.00

E1.16	292.84	0.00	291.85	306.52	293.12	0.00
E1.17	191.60	328.92	330.59	330.43	118.78	956.65
E1.18	116.46	328.92	118.21	330.43	89.50	956.65
E1.19	154.67	360.59	230.94	230.90	103.54	1034.19
E1.20	121.71	360.59	123.25	230.90	94.00	1034.19
E1.21	629.40	0.00	509.89	0.00	1270.42	1245.40
E1.22	419.01	0.00	400.27	0.00	477.01	1245.40
E1.23	429.00	0.00	339.96	0.00	863.95	771.27
E1.24	314.07	0.00	301.40	0.00	359.08	771.27
E1.25	203.95	328.92	212.73	330.43	970.35	956.65
E1.26	130.34	328.92	132.30	330.43	192.17	956.65
E1.27	161.69	354.39	168.64	356.04	608.34	604.64
E1.28	124.63	354.39	126.56	356.04	185.75	604.64
E1.29	850.53	0.00	675.05	394.88	1677.74	1112.01
E1.30	486.56	0.00	467.43	394.88	602.67	1112.01
E1.31	570.60	0.00	455.35	293.02	1088.93	743.45
E1.32	437.42	0.00	424.37	293.02	604.60	743.45
E1.33	426.62	328.92	414.65	330.43	1212.27	956.65
E1.34	235.99	328.92	238.48	330.43	308.98	956.65
E1.35	308.29	387.01	309.35	249.99	798.47	654.71
E1.36	226.59	387.01	228.87	249.99	285.93	654.71
E1.37	784.31	393.26	655.73	0.00	1273.58	1112.57
E1.38	397.13	393.26	379.85	0.00	432.00	1112.57
E1.39	532.89	292.64	447.98	0.00	884.17	743.48
E1.40	428.15	292.64	422.87	0.00	462.16	743.48
E1.41	439.69	328.92	374.10	330.43	970.35	956.65
E1.42	215.49	328.92	203.30	330.43	254.38	956.65
E1.43	330.15	249.51	279.37	388.62	726.30	654.40
E1.44	236.05	249.51	226.46	388.62	258.90	654.40
E1.45	719.57	385.99	674.68	387.81	876.51	0.00
E1.46	330.60	385.99	320.27	387.81	320.08	0.00
E1.47	499.40	292.08	450.34	292.48	718.84	0.00
E1.48	422.51	292.08	412.66	292.48	416.50	0.00
E1.49	558.06	328.92	501.19	330.43	276.35	956.65
E1.50	237.13	328.92	230.17	330.43	172.63	956.65
E1.51	385.91	254.03	353.44	254.37	205.90	1112.02
E1.52	255.16	254.03	245.19	254.37	182.28	1112.02

CASO E.2: SISTEMA HIDRÁULICO CON VÁLVULA DE ALIVIO

IV.16.1 Parámetros y características operacionales del caso E.2.

En base al esquema E.2 en cada uno de los extremos de cada ramal se colocó una válvula de alivio setada a la presión admisible ($H_{set} = 521.24$ m) y también estudiaremos tres modos de operación (10% Q_0 , 40% Q_0 y 100% Q_0).

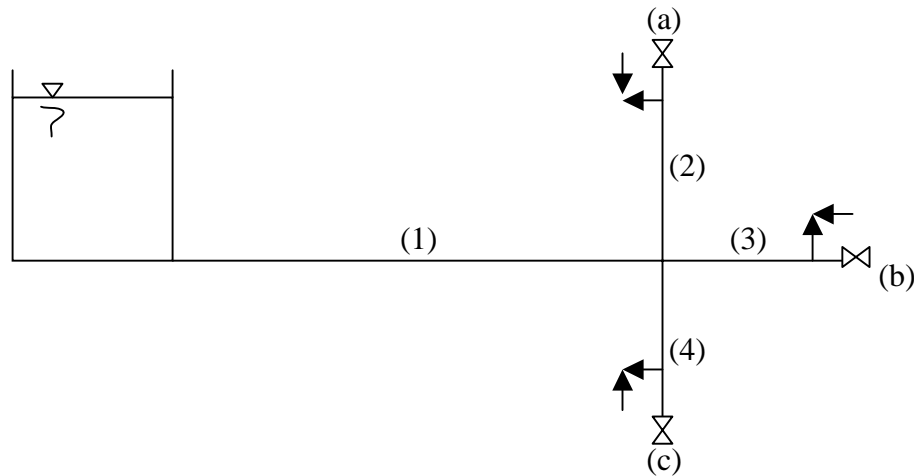


Figura No. IV.16.1 Esquema E.2: Sistema tanque, tuberías y válvulas,

$L_1 = 1186$ m	$L_2 = 111$ m	$L_3 = 14$ m	$L_4 = 111$ m
$D_1 = 0.5$ m	$D_2 = 0.5$ m	$D_3 = 0.5$ m	$D_4 = 0.25$ m

Tabla No. IV.16.1: Caso E.2 Modos de operación y parámetros de la válvula de alivio .

Modos	Válvula a	Válvula b	Válvula c	Q_{ades} (m^3/s)	H_{set} (m)	Q_{bdes} (m^3/s)	H_{bset} (m)	Q_{cdes} (m^3/s)	H_{cset} (m)
C2.1	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.03679	521.24	0.03693	521.24	0.03280	521.24
C2.2	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.14716	521.24	0.14772	521.24	0.13120	521.24
C2.3	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	0.36790	521.24	0.36930	521.24	0.32800	521.24

Tabla No. IV.16.2: Caso E.2 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q_{02} (m^3/s)	Q_{03} (m^3/s)	Q_{04} (m^3/s)
C2.1	0.3679	0.3693	0.3280
C2.2	0.3679	0.3693	0.3280
C2.3	0.3679	0.3693	0.3280

IV.16.2 Resultados obtenidos en el caso E.2

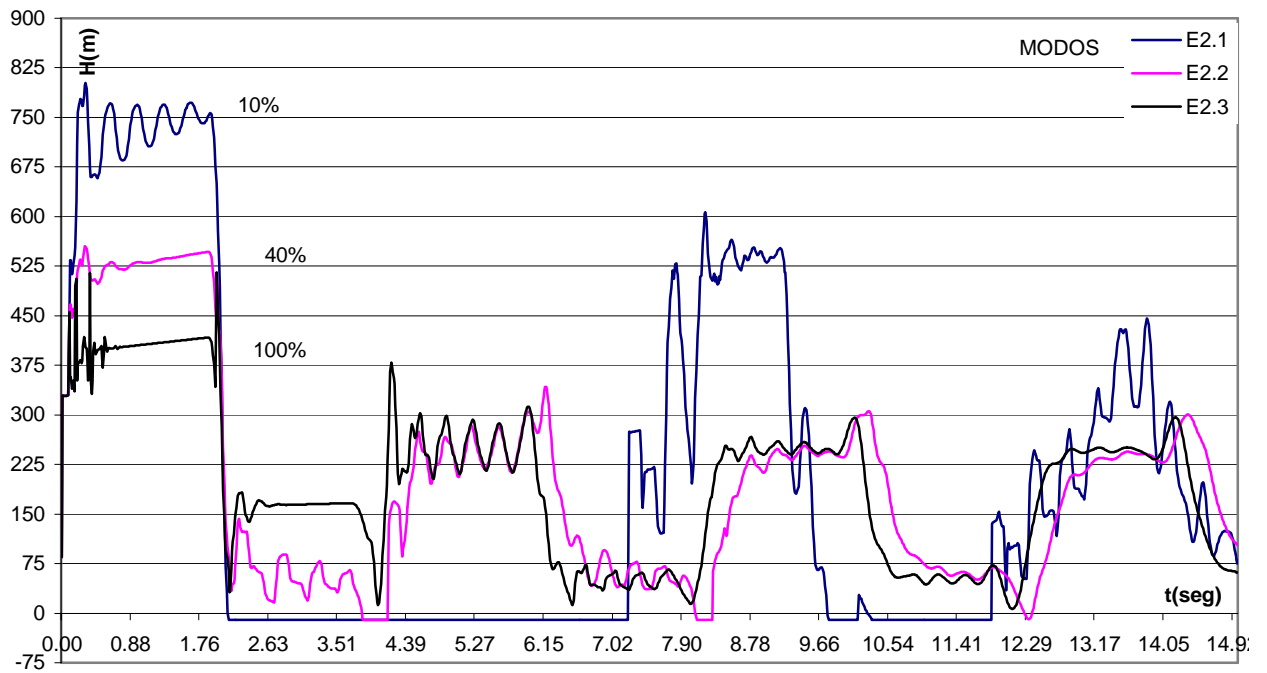


Gráfico No. IV.16.1: Esquema E.2 Variación de presión en la válvula a

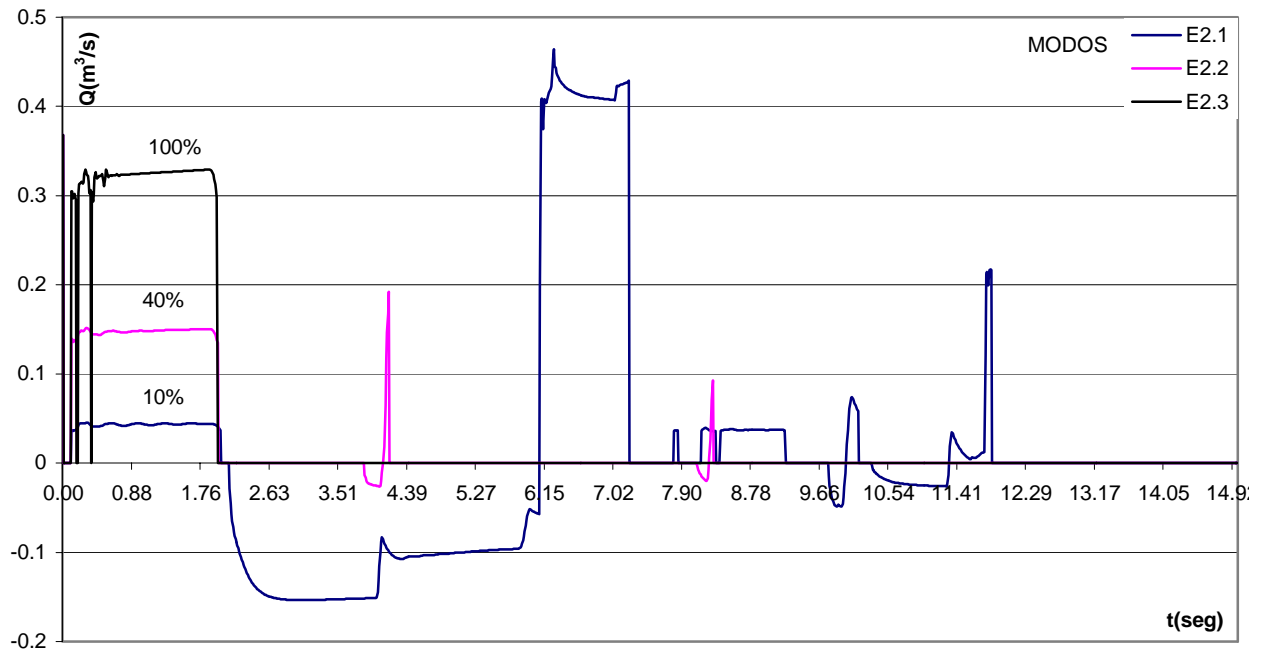


Gráfico No. IV.16.2: Esquema E.2 Variación de caudal en la válvula a

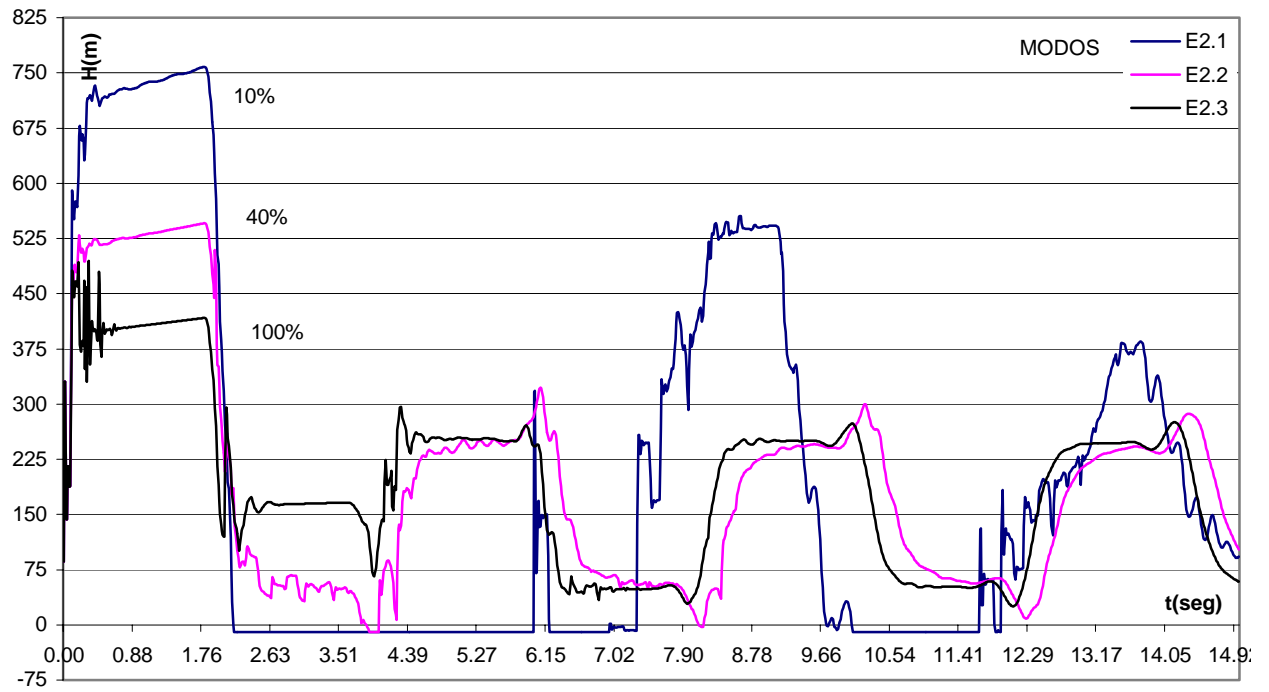


Gráfico No. IV.16.3: Esquema E.2 Variación de presión en la válvula b

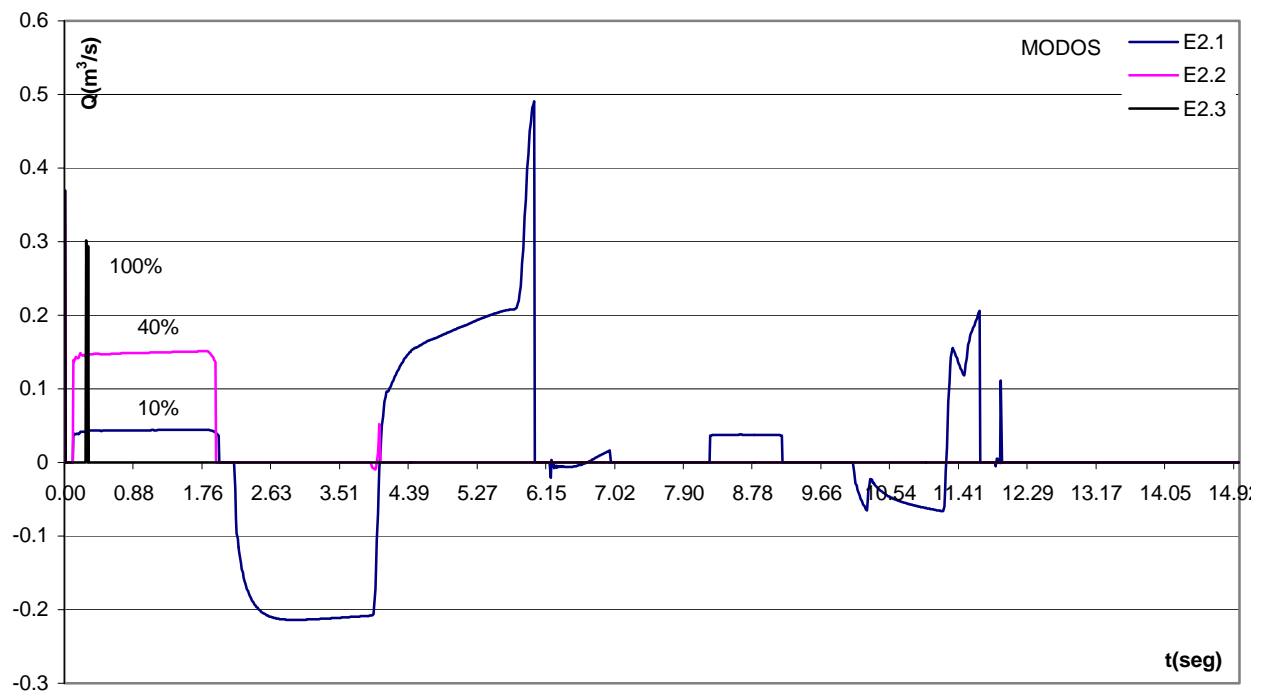


Gráfico No. IV.16.4: Esquema E.2 Variación de caudal en la válvula b

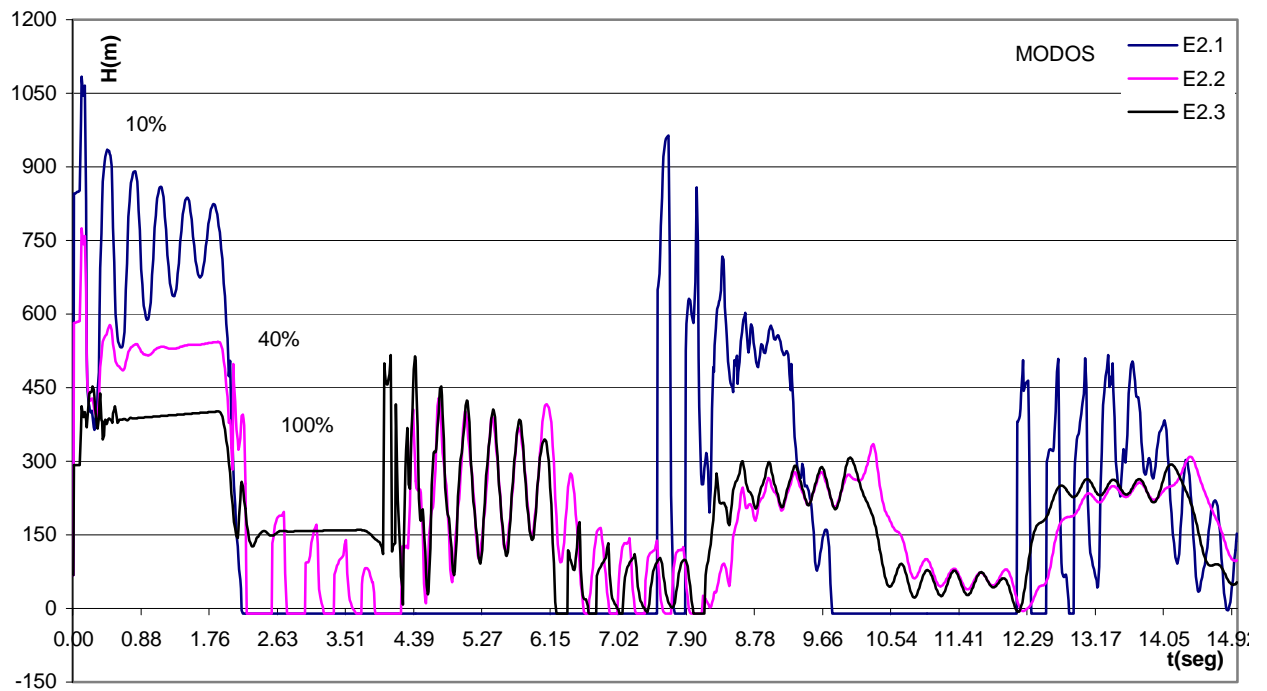


Gráfico No. IV.16.5: Esquema E.2 Variación de presión en la válvula c

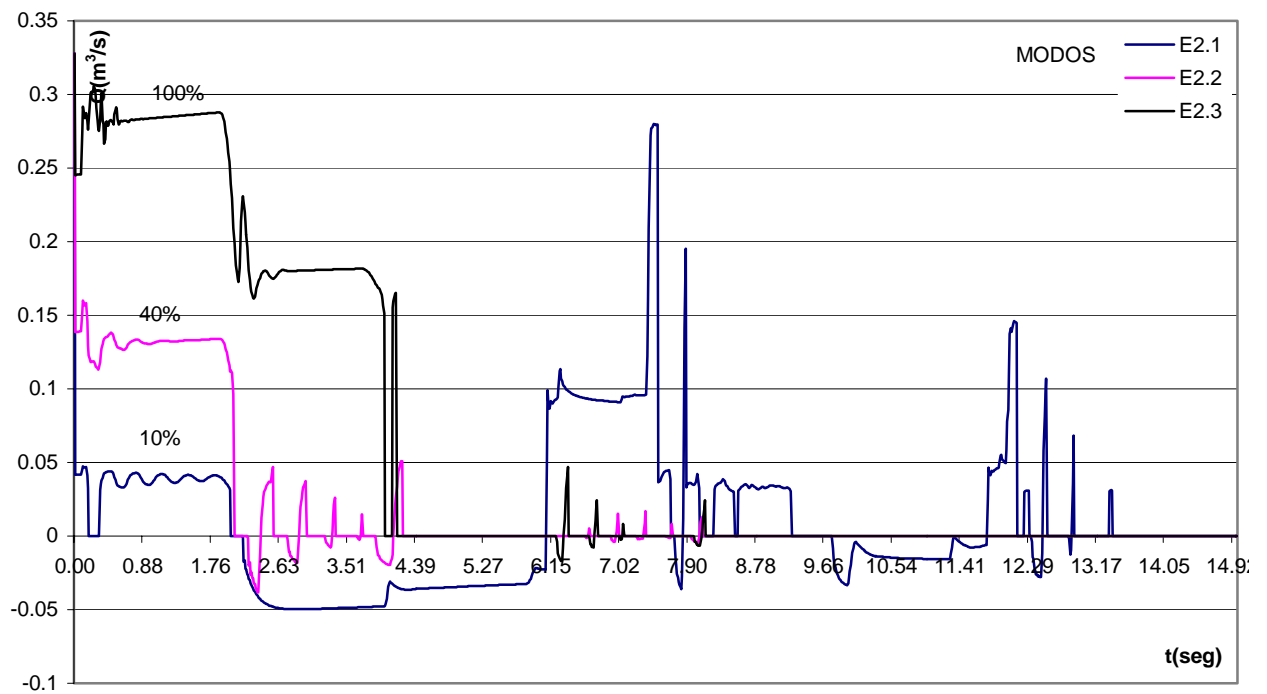


Gráfico No. IV.16.6: Esquema E.2 Variación de caudal en la válvula c

IV.16.3 Análisis de resultados caso E.2

Iniciando con un caudal de desalojo del 10% de Q_0 , se observa en las gráficas No. IV.16.1, IV.16.3 y IV.16.5 que el tamaño de la válvula de alivio no es lo suficientemente grande como para liberar la sobrepresión en cualquiera de los tres ramales, alcanzando presiones muy por encima de la presión de seteo. De hecho en las tres gráficas se observa que la válvula de alivio se abre en repetidas oportunidades para poder bajar las sobrepresiones por debajo de la presión de seteo. En todo caso no basta que la presión se logre bajar un tiempo después sino que nunca se supere la presión de seteo de la misma.

Para un caudal de desalojo del 40% de Q_0 todavía no es suficiente el diámetro del orificio de la válvula de alivio para liberar la sobrepresión necesaria, de hecho en los tres ramales se alcanzan sobrepresiones por encima de la presión de seteo. Bajo esta condición se logra atenuar las sobrepresiones al mismo nivel que para un caudal de desalojo del 100% Q_0 pero en el primer intervalo de tiempo se sobrepasan las presiones admisibles.

Finalmente para un caudal de desalojo del 100% de Q_0 , se logra que el sistema mantenga su presión por debajo de la presión de seteo. Ahora analizando las gráficas del caudal para este modo, se observa que el ramal de la válvula c es el ramal más crítico y fue necesario que la válvula se mantuviera abierta por más tiempo en cambio en la válvula de alivio a en el primer intervalo de tiempo se observa una apertura y cierre de la válvula repetidas veces pudiendo ocasionar posibles daños al sistema debido al chattering de la válvula.

Para los modos E2.2 y E2.3 se logro atenuar en un 66% la sobrepresión de la válvula a , un 64% la sobrepresión de la válvula b y en un 75% la sobrepresión de la válvula c con respecto al modo E1.1.

Nuevamente en las gráficas de caudal (No. IV.16.2, IV.16.4 y IV.16.6) se observa la formación y colapso de la cavidad de vapor en las válvulas, al registrarse caudales negativos y luego de estos caudales positivos.

IV.17 CASO E.3: SISTEMA HIDRÁULICO CON BY-BASS

IV.17.1 Parámetros y características operacionales del caso E.3.

De acuerdo al esquema E.3 se colocó el by-pass antes del nodo de bifurcación de los tres ramales, se estudiara la influencia del by-pass con dos longitudes diferentes.

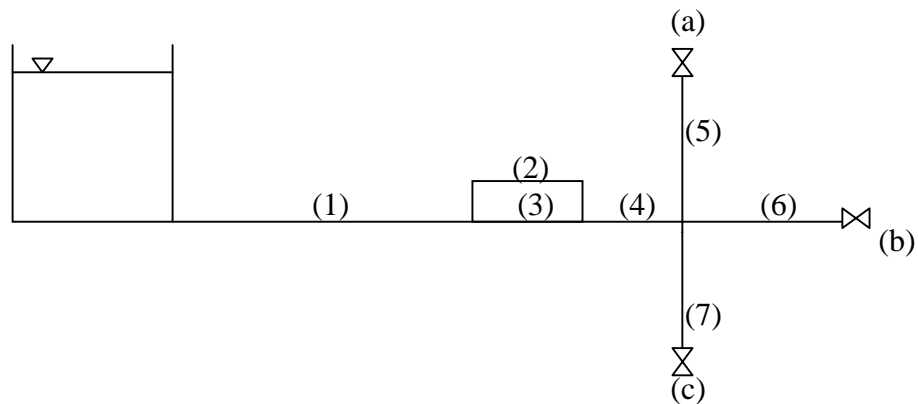


Figura No. IV.17.1 Esquema E.3: Sistema tanque, tuberías y válvulas.

L1 = 1143 m L3 = 22m L4 = 21m L5 = 111 m L6 = 14 m L7 = 111 m
 D1 = 0.5 m D3 = 0.5 D4 = 0.5 D5 = 0.5 m D6 = 0.5 m D7 = 0.25 m

Tabla No. IV.17.1: Caso E.3 Modos de operación, longitud del by-pass.

Modos	Válvula a	Válvula b	Válvula c	L2 (m)	D2 (m)
E3.1	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	113	0.5
E3.2	C.B.A.	C.B.A.	C.B.A.	31	0.5

Tabla No. IV.17.2: Caso E.3 Condiciones de operación en régimen estacionario.

Modos	Q01 (m ³ /s)	Q02 (m ³ /s)	Q03 (m ³ /s)	Q04 (m ³ /s)	Q05 (m ³ /s)	Q06 (m ³ /s)	Q07 (m ³ /s)
E3.1	1.0660	0.3263	0.7396	1.0660	0.3682	0.3695	0.3283
E3.2	1.0670	0.4879	0.5791	1.0670	0.3685	0.3699	0.3286

IV.17.2 Resultados obtenidos en el caso E.3

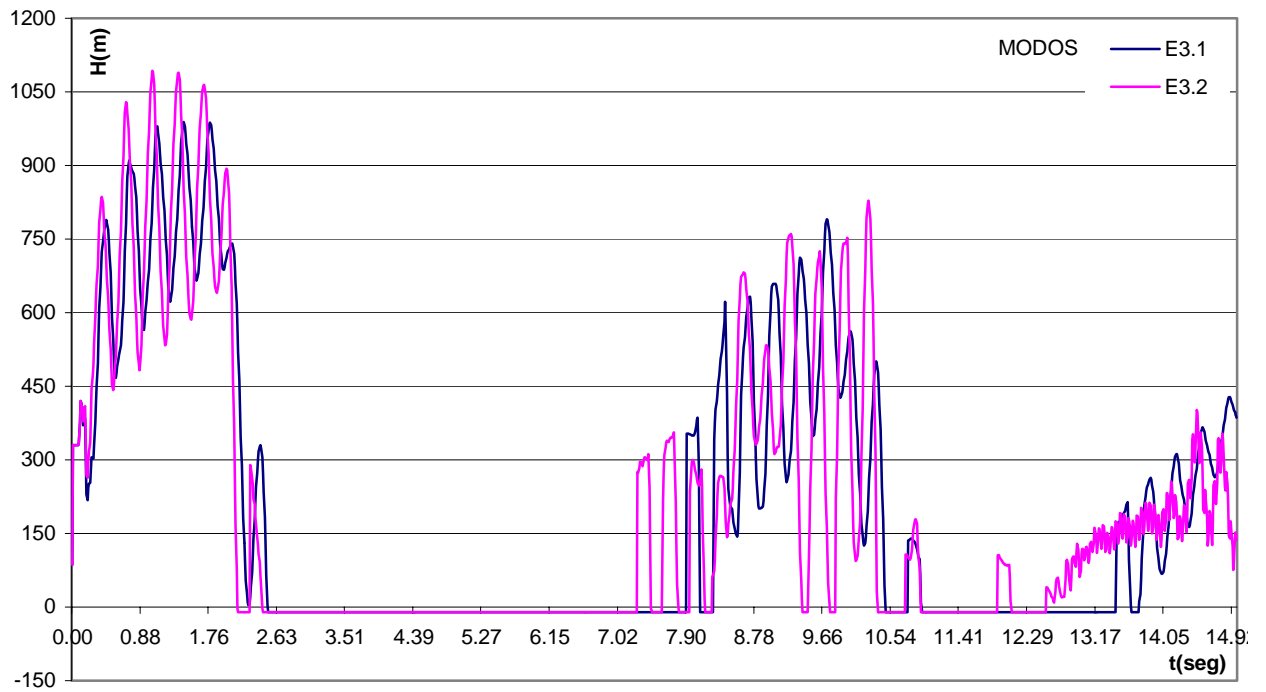


Gráfico No. IV.17.1: Esquema E.3 Variación de presión en la válvula a

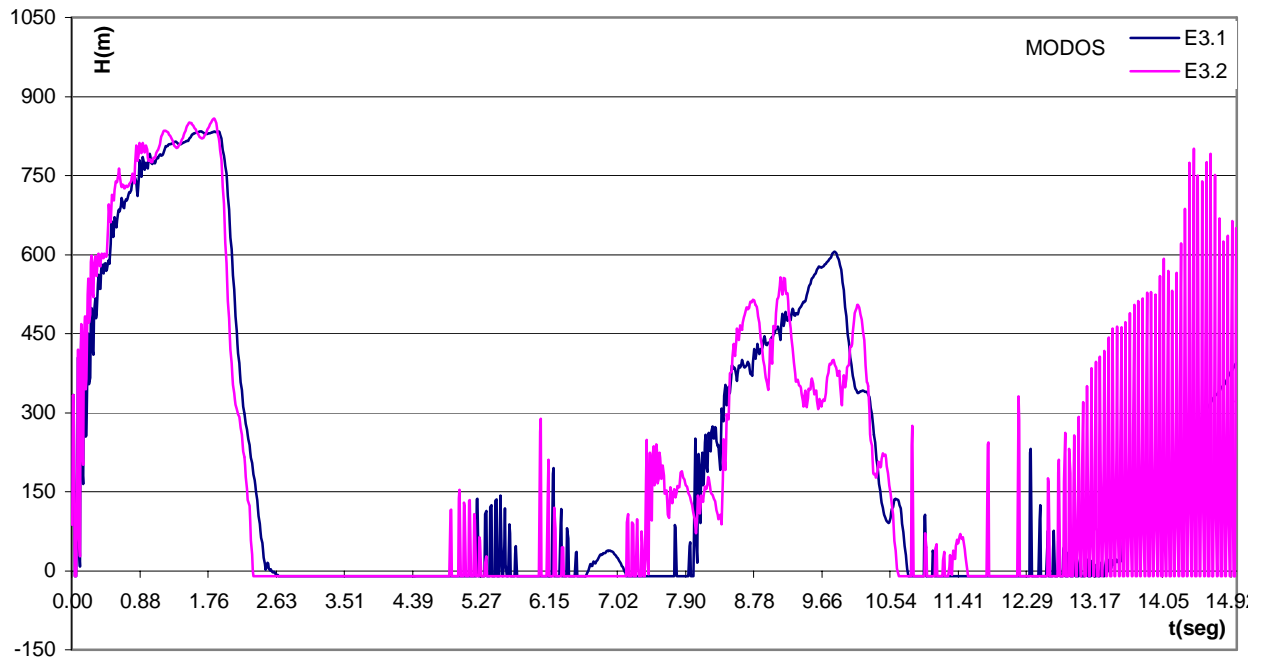


Gráfico No. IV.17.2: Esquema E.3 Variación de presión en la válvula b

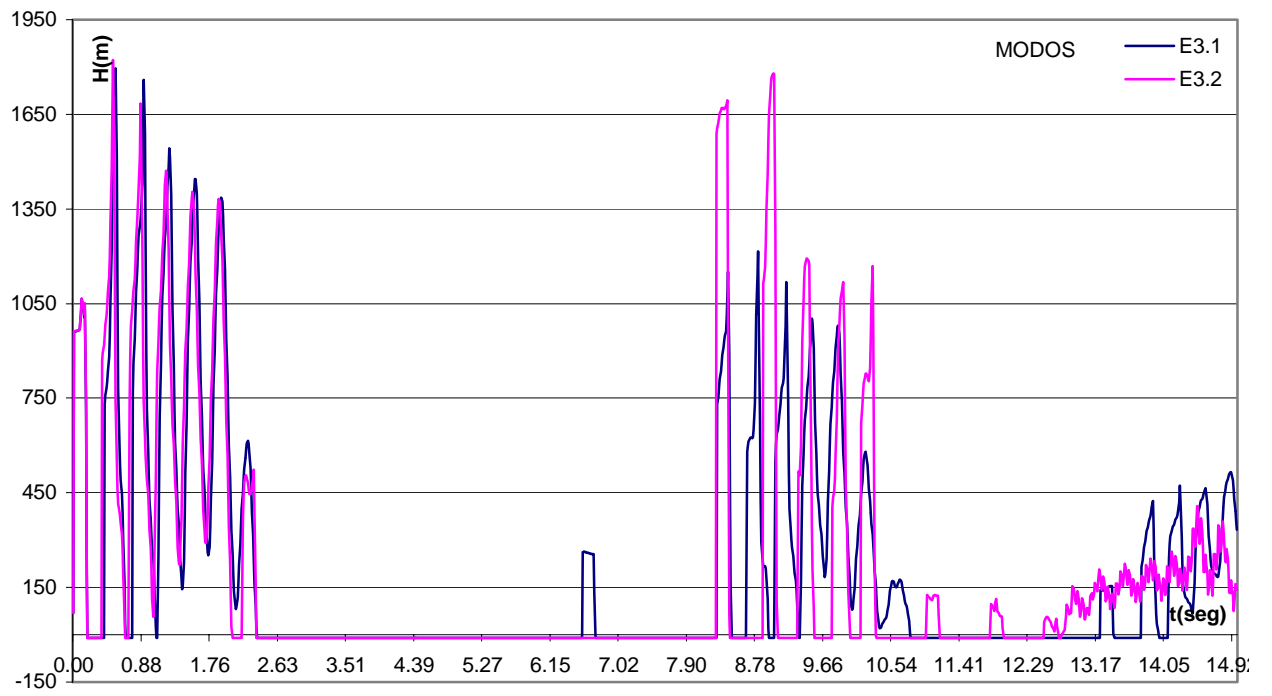


Gráfico No. IV.17.3: Esquema E.3 Variación de presión en la válvula c

IV.17.3 Análisis de resultados caso E.3

Observando las gráficas No. IV.17.1, IV.17.2 y IV.17.3 se ve de nuevo en general un comportamiento parecido entre ellas, al principio una serie de sobrepresiones altas, mayores a las sobrepresiones generadas en el modo E1.1; pero luego de este primer intervalo de tiempo ocurre por un período de tiempo prolongado separación de la columna líquida. Con respecto a la longitud del by-pass, en los tres gráficos se observan sobrepresiones de mayor magnitud para la longitud menor (modo E3.2) así como también se observa que la variación de presión para este modo es mayor debido al tener una longitud de by-pass menor tenemos un período de oscilación menor y por lo tanto aparecerán con mayor rapidez nuevas ondas de presión.

En este caso igual al caso D.3 se tienen una oscilación de presiones con una frecuencia de oscilación muy alta. Este comportamiento se atribuye a la inserción del by-pass cerca del nodo de unión de los ramales, creando dos nuevos nodos de unión, conectados entre sí por tuberías muy cortas, por lo tanto el fenómeno de transmisión y reflexión de ondas de presión se incrementa.

CONCLUSIONES

- El método de las Características es un método de cálculo de reconocida validez y con mayor uso en el mercado, demostrando una vez más la flexibilidad del mismo al poder resolver los 191 casos estudiados en este trabajo con un solo algoritmo.
- El estudio de las diferentes combinaciones creadas a partir de un sistema de tuberías sencillo permite determinar a cualquier persona, de una manera muy rápida el comportamiento que podrá tener un sistema hidráulico parecido a cualquiera de los casos aquí estudiados.
- Las características geométricas de la sección transversal de la tubería influyen directamente sobre la velocidad de onda generada, teniendo relaciones de D/e mayores la velocidad de onda disminuye y en consecuencia la magnitud de la sobrepresión generada disminuye.
- La magnitud del caudal es directamente proporcional a la magnitud de la sobrepresión generada, siendo observado claramente en los modos de cierre de válvula brusco con válvula al inicio parcialmente abierta ($\tau_i = 0.5$).
- En los modos de cierre gradual se evidencia una atenuación en la magnitud de la sobrepresión generada entre un 60% y 35% con respecto al modo de cierre brusco.
- El fenómeno de separación de columna puede generar en algunos casos sobrepresiones mayores a las generadas por el cierre brusco de una válvula, demostrando la importancia del mismo.
- Los ramales inactivos en los sistemas hidráulicos afectan negativamente al comportamiento del mismo, debido a que pueden incrementar notablemente las

magnitudes de las sobrepresiones alcanzadas, superando inclusive a la estimada por la ecuación de Joukowsky .

- La sobrepresión alcanzada en sistemas de tuberías ramificados llega a ser tres veces mayor a la sobrepresión calculada por Joukowsky.
- Los ramales cortos en sistemas de tuberías ramificados pueden ser simplificados debido a la poca influencia de los mismo sobre la magnitud de la sobrepresión generada.
- La utilización del by-pass como dispositivo de atenuación, requiere de un estudio muy cuidadoso para lograr una atenuación exitosa.
- El diseño y selección de una válvula de alivio requiere de un estudio previo para lograr su objetivo, sin embargo con un caudal de desalojo del 100% al caudal en estado estacionario, se asegura una rápida atenuación de las sobrepresiones generadas.
- El programa de cálculo generado en FORTRAN esta diseñado con la facilidad de evaluar cientos de casos distintos a los aquí estudiados y además por su flexibilidad permite agregar condiciones de borde extras y de esta manera expandir aun más su utilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- Axworthy, D.H. y Karney, B.W., “Valve Closure in Graph – Theoretical Models for Slow Transient Network Analysis”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 126, no. 4, pag. 304 – 309, Abril 2000.
- 2.- Bergant, A. y Simpson, A.R., “Pipeline Column Separation Flow Regimes”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, no. 8, pag. 835 – 848, Agosto 1999.
- 3.- Brunone, B., Golia, U.M. y Greco, M., “Effects of Two – Dimensionality on Pipe Transients Modeling”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 121, no. 12, pag. 906 – 912, Diciembre 1995.
- 4.- Brunone, B. y Morelli, L., “Automatic Control Valve – Induced Transients in Operative Pipe System”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, no. 5, pag. 534 – 542, Mayo 1999.
- 5.- Chaudry, M.H., Silva, W. y Elansary, A.S., “Numerical and experimental investigation of transient pipe flow”, Journal of Hydraulic Research, vol. 32, pag. 689 – 706, 1994.
- 6.- Cioc, D., “Mecánica de Fluido (en Rumano)”, Editorial Didáctica y Pedagógica, Bucarest, 1967.

- 7.- Cioc, D., Popa, S., Zarea, S., “Dispositif de protection contre le coup de belier”, Invento 53776, 1971.
- 8.- Garmendia, S.A., “Cálculo de la Sobrepresión en Régimen de Transición en el Nodo y los Extremos de los Ramales de Tuberías Ramificadas”, Tesis, U.S.B., Tutor Prof. S. Zarea, Caracas, 2000.
- 9.- Hadj – Taïeb, E. Y Lili, T., “Validation of Hiperbolic Model for Water-Hammer in Deformable Pipes”, Journal of Fluids Engineering, vol. 122, pag. 57 – 64, Marzo 2000.
- 10.- Karney, B.W. y Ghidaoui, M.S., “Flexible Discretization Algorithm for Fixed – Grid MOC in Pipelines”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, no. 11, pag. 1004 – 1011, Noviembre 1997.
- 11.- Kerh, T., Lee, J.J. y Wellford, L.C., “Transient Fluid – Structure Interaction in a Control Valve”, Journal of Fluids Engineering, vol. 119, pag. 354 – 359, Junio 1997.
- 12.- Labrador, L.O., “Cálculo del Golpe de Ariete con el Método Zarea”, Tesis, IUPFAN, prof. S. Zarea, 1992.
- 13.- Lee, T.S., “Air Influence on Hydraulic Transients on Fluid System With Air Valves”, Journal of Fluids Engineering, vol. 121, pag. 646 – 650, Septiembre 1999.

- 14.- Marquez, A., “Estudio del régimen transitorio de un circuito hidráulico mediante el método de las ondas físicas asociadas”, Tesis, U.S.B., prof. S. Zarea, 1984.
- 15.- McInnis, D.A., Karney, B.W. y Axworthy, D.H., “Efficient Valve Representation in Fixed – Grid Characteristics Method”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, no. 8, pag. 709 – 718, Agosto 1997.
- 16.- Mendez, M.V., “Tuberías a Presión”, U.C.A.B., Caracas, 1995.
- 17.- Mexeira, J., “Estudio del Flujo Transitorio en Sistemas de Tuberías por los Métodos de las Ondas Físicas Asociadas y el de las Características”, Tesis, U.S.B., prof. S. Zarea, 1987.
- 18.- Muiño, C.J., Rodriguez, C., “Características Operacionales y Criterios de Selección de las Válvulas de fabricación nacional”, Tesis, U.C.V., prof. S. Zarea, 1990.
- 19.- Parmakian, J., “Waterhammer Analysis”, Dover Publication, Inc., New York, 1963.
- 20.- Rondon, L.E., Sforza, M., “Estudio comparativo de Sistemas de Protección de tuberías contra el Golpe de Ariete”, Tesis, U.C.V., prof. S. Zarea, 1989.
- 21.- Sanchez, M., “Ondas de Presión y de Caudal en Sistemas Hidráulicos Sencillos”, Anales de Ingeniería Mecánica, año 4, no. 1, 1986.

22.- Sanchez, M., “Evaluación del Flujo Transitorio en Sistemas Hidráulicos de Bombeo”, Anales de Ingeniería Mecánica, año 4, no. 1, 1986.

23.- Shimada, M., “Graph – Theoretical Model for Slow Transient Analysis of Pipe Networks”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 115, no. 9, pag. 1165 – 1183, Septiembre 1989.

24.- Swaffield, J.A. y Boldy, A.P., “Pressure surge in pipe and duct systems”, Avebury Technical, U.S.A., 1993.

25.- Tanaka, T. y Tsukamoto, H., “Transient Behavior of a Cavitating Centrifugal Pump at Rapid Change in Operating Conditions – Part 1: Transient Phenomena at Opening / Closure of Discharge Valve”, Journal of Fluids Engineering, vol. 121, pag. 841 – 849, Diciembre 1999.

26.- Tanaka, T. y Tsukamoto, H., “Transient Behavior of a Cavitating Centrifugal Pump at Rapid Change in Operating Conditions – Part 2: Transient Phenomena at Pump Startup / Shutdown”, Journal of Fluids Engineering, vol. 121, pag. 850 – 856, Diciembre 1999.

27.- Tanaka, T. y Tsukamoto, H., “Transient Behavior of a Cavitating Centrifugal Pump at Rapid Change in Operating Conditions – Part 3: Classifications of Transient”, Journal of Fluids Engineering, vol. 121, pag. 857 – 865, Diciembre 1999.

- 28.- Wylie, E.B., "Fundamental Equations of Waterhammer", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, no. 4, pag. 539 – 542, Abril 1984.
- 29.- Wylie, E.B., "The Microcomputer and Pipeline Transients", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 109, no. 12, pag. 1723 – 1739, Diciembre 1983.
- 30.- Wylie, E.B., Streeter, V.L. y Suo, L., "Fluid Transients in Systems", Prentice Hall, NJ, 1993.
- 31.- Zarea, S., Jelev, I., "Estudio del Golpe de Ariete en una Tubería Protegida con Chimeneas de Equilibrio y Cámaras de Aire utilizando un computador", I, (en Rumano), St. Cerc. Mec. Apl. Tomo 34, No 2 , 1975, pag. 289 – 302, Bucarest.
- 32.- Zarea, S., Jelev, I., "Estudio del Golpe de Ariete en una Tubería Protegida con Chimeneas de Equilibrio y Cámaras de Aire utilizando un computador", II, el programa, (en Rumano), St. Cerc. Mec. Apl. Tomo 35, No 1 , pag. 23-26, 1976, Bucarest.
- 33.- Zarea, S., Popescu, M., "Asupra semnificatiei si folosirii unor termeni tehnici privind instalatiile de compensare a debitului si de protectie la lovitura de berbec", Hidrotehnica, 1973.
- 34.- Zarea, S., Popescu, M. y Jelev, I., "Calculul rezervoarelor de aer din sistemele hidraulice sub presiune, in ipoteza miscarii lent variabile", St. Cerc. Mec. Apl. Tomo 36, No 4 , pag. 502-512, 1977, Bucarest.

35.- Zarea, S., Vasiliu, N., "L'Analyse de l'efficacité de la cheminée d'équilibre par la Méthode des Ondes Associées de débit et de pression", Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, Paris, 1973.

36.- Zarea, S., Vasiliu, N., "Nouvelles relations pour l'étude de l'Influence de la Cheminée D'Equilibre sur une Onde Incidente Simple", Mécanique Appliquée, tomo 18, No 6, pag. 1135 – 1157, Bucarest, 1973.

37.- Zarea, S., Vasiliu, N., "Analysis of the Pressure Waves Propagation within a Buffer Reservoir Tapped on a Pipe System", Bull. Inst. Polit. "Gheorghe Gheorghiu-Dej", tomo XXXV, No 1, Bucarest, 1973.

38.- Zaruba, J., "Water Hammer in Pipe-Line Systems (Developments in Water Science, 43)", 1993.

APÉNDICE A: Programa en FORTRAN

```

C
C  PROGRAMA DE SIMULACION DEL GOLPE DE ARIETE
C  METODO DE LAS CARACTERISTICAS

```

```

DIMENSION C1(15),QI(15),F(15),N(15),C(15),BULKEFF(15),HAORV(15)
DIMENSION TL(15),D(15),ES(15),E(15),RP(15),IP(15),VOL(15),CVP(15)
DIMENSION NJE(10,15),NJS(10,15),NENT(15),HUPRES(15),HN(10)
DIMENSION ORV(15),QORV(15),HORV(15),PORV(15),CVORV(15),DT0(15)
DIMENSION DX(15),H0(15),Q0(15),NPTS(15),TAUD(15,101),B(15),R(15)
DIMENSION TIMD(15,101),X(15,101),Q(15,101),H(15,101),NTS(10)
DIMENSION HRES(15),HX(15,101),QR(15,101),HR(15,101),NTE(10)
DIMENSION QS(15,101),HS(15,101),CP(15,101),BP(15,101),CM(15,101)
DIMENSION BM(15,101),HH(15,101),QQ(15,101),A(15),NEXT(15),NP(15)
OPEN(UNIT=10,FILE='DATOS.DAT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=11,FILE='DATOS1.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=12,FILE='DATOS2.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=13,FILE='DATOS3.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=14,FILE='DATOS4.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=15,FILE='DATOS5.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=16,FILE='DATOS6.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=17,FILE='DATOS7.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=18,FILE='DATOS8.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=19,FILE='DATOS9.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=20,FILE='DATOS10.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=21,FILE='DATOS11.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=22,FILE='DATOS12.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=23,FILE='DATOS13.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=24,FILE='DATOS14.OUT',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=25,FILE='DATOS15.OUT',STATUS='UNKNOWN')
G=9.806
TIME=0.0

```

```

C
C  DEFINICION DEL SISTEMA
C

```

```

WRITE(6,*)'INTRODUZCA NUMERO DE TUBERIAS TOTALES COMPUESTA'
WRITE(6,*)'POR LA RED,(MAX.15)'
READ(5,*)NTUBO
DO 5 K=1,NTUBO
VOL(K)=0.0
5  CONTINUE
WRITE(6,*)'INTRODUZCA NUMERO DE NODOS,(MAX.10)'
READ(5,*)NJ
IF (NJ.EQ.0) GOTO 32
DO 30 I=1,NJ
WRITE(6,*)'INTRODUZCA NUMERO DE TUBERIAS TOTALES'
WRITE(6,*)'QUE LLEGAN AL NODO',I
READ(5,*)NTE(I)

```

```

DO 10 J=1,NTE(I)
WRITE(6,*)'INTRODUZCA EL NUMERO DE CADA TUBERIA'
WRITE(6,*)'QUE LLEGA AL NODO',I
READ(5,*)NJE(I,J)
10  CONTINUE
WRITE(6,*)'INTRODUZCA NUMERO DE TUBERIA TOTALES'
WRITE(6,*)'QUE SALEN DEL NODO',I
READ(5,*)NTS(I)
DO 20 J=1,NTS(I)
WRITE(6,*)'INTRODUZCA EL NUMERO DE CADA TUBERIA'
WRITE(6,*)'QUE SALE DEL NODO',I
READ(5,*)NJS(I,J)
20  CONTINUE
30  CONTINUE
32  WRITE(10,*)'DATOS DEL SISTEMA'
WRITE(10,11)NTUBO,NJ
11  FORMAT(/,'CANTIDAD DE TUBERIAS =',I3,
1/, 'CANTIDAD DE NODOS =',I3)
C
C  PROPIEDADES DEL FLUIDO
C
WRITE(6,*)'INTRODUZCA LA DENSIDAD DEL FLUIDO,KG/M^3'
READ(5,*)RHO
WRITE(6,*)'INTRODUZCA MODULO DE ELASTICIDAD DEL
LIQUIDO,KN/M^2'
READ(5,*)XK
XK=XK*1000.0
WRITE(6,*)'INTRODUZCA PRESION DE VAPOR DEL FLUIDO,KN/M^2'
READ(5,*)PVAP
PVAP=PVAP*1000.0
WRITE(10,*)'PROPIEDADES DEL FLUIDO'
WRITE(10,12)XK,RHO,PVAP
12  FORMAT('MODULO DE ELASTICIDAD=',F12.0,' N/M^2'
1/, 'DENSIDAD DEL FLUIDO=',F8.2,' KG/M^3'
2/, 'PRESION DE VAPOR=',F9.0,' N/M^2')
C
C  CONTENIDO DE GAS DISUELTO
WRITE(6,*)'INDIQUE PRESENCIA DE GAS DISUELTO...!'
WRITE(6,*)'0 = NO HAY PRESENCIA DE GAS'
WRITE(6,*)'1 = GAS DISUELTO UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO'
READ(5,*)IG
GAS=0.0
GASP=1.0
RHOG=0.0
IF(IG.EQ.0) GOTO 13
WRITE(6,*)'INTRODUZCA RELACION VOLUMETRICA DEL GAS DISUELTO'
WRITE(6,*)'A LA PRESION DE LA LINEA'

```

```

READ(5,*)GAS
WRITE(6,*)'INTRODUZCA DENSIDAD DEL GAS,KG/M^3'
READ(5,*)RHOG
WRITE(6,*)'PRESION ABSOLUTA DEL GAS,KN/M^2'
READ(5,*)GASP1
GASP=GASP1*1000.0
WRITE(10,*)'PROPIEDADES DEL GAS DISUELTO'
WRITE(10,14)GAS,RHOG,GASP1
14  FORMAT('RELACION VOLUMETRICA DEL GAS DISUELTO=',F7.4,
1/, 'DENSIDAD DEL GAS=',F7.3,' KG/M^3'
2/, 'PRESION ABSOLUTA DEL GAS=',F8.3,' KN/M^2')
C
C  DATOS DE CADA TUBERIA
C
13  CONTINUE
RHOEFF=GAS*RHOG+(1.0-GAS)*RHO
HVAP=PVAP/(RHOEFF*G)
DO 40 I=1,NTUBO
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'PARA CADA TUBERIA INTRODUCZA LOS'
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'SIGUIENTES DATOS'
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'NOTA: TODOS LOS DATOS DEBEN'
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'ESTAR EN UNIDADES'
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'SI, LAS ALTURAS EN M Y'
IF (I.EQ.1) WRITE(6,*)'LOS FLUJOS EN M^3/S.'
WRITE(6,*)'PARA LA TUBERIA=',I
WRITE(6,*)'LONGITUD,DIAMETRO,ESPESOR DE PARED'
READ(5,*)TL(I),D(I),ES(I)
WRITE(6,*)'MODULO DE YOUNG (KN/M^2)'
  READ(5,*)E(I)
E(I)=E(I)*1000.0
RP(I)=0.3
WRITE(6,*)'INDIQUE TIPO DE RESTRICCION DE LA TUBERIA',I
WRITE(6,*)'TUBERIA SUJETA UNICAMENTE EN SU EXTREMO SUPERIOR'
WRITE(6,*)'Y CON POSIBILIDADES DE MOVERSE AXIALMENTE-----> 1'
WRITE(6,*)'TUBERIA SUJETA EN AMBOS EXTREMOS'
WRITE(6,*)'IMPIDIENDO MOVIMIENTOS AXIALES-----> 2'
WRITE(6,*)'TUBERIA SUJETA EN AMBOS EXTREMOS'
WRITE(6,*)'Y CON JUNTAS DE EXPANSION-----> 3'
WRITE(6,*)'TUBERIA CON JUNTAS DE EXPANSION A LO LARGO DE SU'
WRITE(6,*)'LONGITUD,PERMITIENDO DESPLAZAMIENTOS AXIALES----> 4'
READ(5,*)IP(I)
C1(I)=1.0
IF (IP(I).EQ.1) C1(I)=(5.0/4.0)-RP(I)
IF (IP(I).EQ.2) C1(I)=1.0-RP(I)**2
IF (IP(I).EQ.3) C1(I)=1.0-0.5*RP(I)
WRITE(6,*)'FLUJO INICIAL Y FACTOR DE FRICCION DE',I
READ(5,*)QI(I),F(I)

```

```

WRITE(6,*)'NUMERO DE SECCIONES DX EN LA LONGITUD DE LA
TUBERIA',I
READ(5,*)N(I)
NP(I)=N(I)/5
C
C CALCULO DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA
C
BULKEFF(I)=1.0/((1.0-GAS)/XK+GAS/GASP+D(I)*C1(I)/(E(I)*ES(I)))
C(I)=SQRT(BULKEFF(I)/RHOEFF)
IF (I.EQ.1) WRITE(10,*)'DATOS PARA CADA TUBERIA'
IF (I.EQ.1) WRITE(10,15)
15 FORMAT('TUBERIA ', 'LONGITUD ', 'DIAMETRO ', 'CAUDAL '
1, 'FACT.FRIC. ', 'NRO.DX ', 'VELOC. ONDA')
WRITE(10,16)I, TL(I), D(I), QI(I), F(I), N(I), C(I)
16 FORMAT(I4, F12.1, F8.3, 2F9.4, I8, F13.1)
C
C CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA PARA CADA TUBERIA
C
C CONDICIONES DE ENTRADA
WRITE(6,*)'INDIQUE CONDICION DE ENTRADA DE LA TUBERIA',I
WRITE(6,*) 0 - CONECTADA A UN TANQUE'
WRITE(6,*) 1 - PERTENECE A ALGUN NODO'
READ(5,*)NENT(I)
C
C PRESION DEL TANQUE AGUAS ARRIBA
C
IF (NENT(I).EQ.0) WRITE(6,*)'ALTURA DEL TANQUE?'
IF (NENT(I).EQ.0) READ(5,*)HUPRES(I)
C
C CONDICIONES DE SALIDA
C
WRITE(6,*)'INDIQUE CONDICION DE SALIDA DE LA TUBERIA',I
WRITE(6,*) 0 - CONECTADA A UN TANQUE'
WRITE(6,*) 1 - VALVULA'
WRITE(6,*) 2 - PERTENECE A ALGUN NODO'
WRITE(6,*) 3 - EXTREMO CERRADO'
READ(5,*)NEXT(I)
C
C OPCION DE VALVULA DE ALIVIO
C
IF(NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3)WRITE(6,*)'INDIQUE PRESENCIA'
IF(NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3)WRITE(6,*)'DE VALVULA DE ALIVIO'
IF (NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3) WRITE(6,*)'0-NO HAY VALVULA'
IF (NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3) WRITE(6,*)'1-HAY VALVULA DE'
IF (NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3) WRITE(6,*)'ALIVIO'
IF (NEXT(I).EQ.1.OR.NEXT(I).EQ.3) READ(5,*)ORV(I)
IF (ORV(I).EQ.1)WRITE(6,*)'INTRODUZCA CAUDAL Y ALTURA EN ESTADO'

```

```

IF (ORV(I).EQ.1)WRITE(6,*)'ESTACIONARIO EN LA VALVULA DE ALIVIO'
IF (ORV(I).EQ.1)WRITE(6,*)"TOTALMENTE ABIERTA, M^3/S Y M'
IF (ORV(I).EQ.1) READ(5,*)QORV(I),HORV(I)
IF (ORV(I).EQ.1) WRITE(6,*)'PRESION DE APERTURA DE LA VALVULA'
IF (ORV(I).EQ.1) WRITE(6,*)'DE ALIVIO,KN/M^2'
IF (ORV(I).EQ.1) READ(5,*)PORV(I)
IF (ORV(I).EQ.1) PORV(I)=PORV(I)*1000.0
IF (ORV(I).EQ.1) HAORV(I)=PORV(I)/(RHOEFF*G)
C
C   CALCULO DEL INTERVALO DE TIEMPO
C
DT0(I)=(TL(I)/FLOAT(N(I)))/C(I)
DX(I)=TL(I)/FLOAT(N(I))
40  CONTINUE
C
C   CALCULO DE LOS COEFICIENTES B Y R
C
DO 42 I=1,NTUBO
A(I)=3.142*D(I)**2/4.0
R(I)=(F(I)*DX(I))/(2.0*G*D(I)*A(I)**2)
B(I)=C(I)/(G*A(I))
42  CONTINUE
C
C   CARACTERISTICAS DE CADA UNA DE LAS VALVULAS
C
DO 44 I=1,NTUBO
IF (NEXT(I).EQ.1) GOTO 46
GOTO 44
46  WRITE(6,*)'INTRODUZCA LOS DATOS PARA LA VALVULA DE SALIDA'
WRITE(6,*)'TOTALMENTE ABIERTA, PERTENECIENTE A LA TUBERIA',I
WRITE(6,*)'ALTURA EN ESTADO ESTACIONARIO, M'
READ(5,*)H0(I)
WRITE(6,*)'CAUDAL QUE ATRAVIESA,M^3/S'
READ(5,*)Q0(I)
44  CONTINUE
C
C   "LEY DE CIERRE DE VALVULA"
C
DO 50 I=1,NTUBO
IF (NEXT(I).EQ.1) GOTO 51
GOTO 50
51  WRITE(6,*)'INTRODUZCA LOS DATOS PARA LA VALVULA DE SALIDA'
WRITE(6,*)'PERTENECIENTE A LA TUBERIA',I
WRITE(6,*)'INTRODUZCA EL NUMERO DE INTERVALOS DE TIEMPO'
READ(5,*) NPTS(I)
DO 52 K=1,NPTS(I)
WRITE(6,*)'INTRODUZCA EL PAR TIEMPO vs TAU'

```

```

    READ(5,*) TIMD(I,K),TAUD(I,K)
52  CONTINUE
50  CONTINUE
C
C  CALCULO CONDICIONES INICIALES
C
    DO 60 I=1,NTUBO
    DO 60 J=1,N(I)+1
    IF (J.EQ.1) X(I,J)=0.0
    IF (J.GT.1) X(I,J)=X(I,J)+DX(I)
    Q(I,J)=QI(I)
60  IF (NENT(I).EQ.0) H(I,1)=HUPRES(I)
    DO 62 I=1,NTUBO
    DO 61 K=1,NJ
    HN(K)=H(NJE(K,1),N(NJE(K,1))+1)
    DO 63 L=1,NTE(K)
    H(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)=HN(K)
63  CONTINUE
    DO 65 M=1,NTS(K)
    H(NJS(K,M),1)=HN(K)
65  CONTINUE
61  CONTINUE
    DO 64 J=2,N(I)+1
    H(I,J)=H(I,J-1)-R(I)*Q(I,J)**2
64  CONTINUE
    IF (NEXT(I).EQ.0) HRES(I)=H(I,N(I)+1)
    IF (NEXT(I).EQ.1) HRES(I)=H0(I)
    IF (NEXT(I).EQ.1.AND.TAUD(I,1).EQ.0.0) GOTO 66
    GOTO 68
C
C  PARA UNA VALVULA CERRADA INICIALMENTE SE DEBE DEFINIR
C  LA PRESION DE SALIDA
66  WRITE(6,*)'INTRODUZCA LA ALTURA AGUAS ABAJO DE LA VALVULA'
    READ(5,*)HRES(I)
68  CONTINUE
62  CONTINUE
C
C  EL INTERVALO DE TIEMPO PARA EL ANALISIS DEBE SER COMUN
C  PARA TODAS LAS TUBERIAS
    WRITE(6,*)'LOS INTERVALOS DE TIEMPO CALCULADOS PARA LA RED
SON:'
    WRITE(6,115)('DT0(',K,')',DT0(K),K=1,NTUBO)
115  FORMAT(A6,I2,A1,F15.9)
    WRITE(6,*)'SELECCIONE EL MINIMO INTERVALO DE TIEMPO (1,..N):'
    READ(5,*) K
    DT=DT0(K)
C

```



```

C   TIEMPO TOTAL DE CALCULO
C
WRITE(6,*)'INTRODUZCA TIEMPO TOTAL DE CALCULO'
READ(5,*) TMAX
C
C   CALCULO CONDICIONES BASES PARA CADA INTERVALO DE TIEMPO
C
DO 95 I=1,NTUBO
DO 95 K=1,N(I)+1
95  HX(I,K)=H(I,K)
100 CONTINUE
C
C   ALMACENAMIENTO DE DATOS EN UN ARCHIVO PARA CADA TUBERIA
C
DO 200 M=11,NTUBO+10
IF (TIME.EQ.0.0) WRITE(M,101)
101 FORMAT(//,' TIEMPO;', I,6(' J  ALTURA  CAUDAL'))
I=M-10
WRITE(M,102) TIME,I,(J,HX(I,J),Q(I,J),J=1,N(I)+1,NP(I))
102 FORMAT(F7.4,I3,6(I3,F10.2,F10.4))
200 CONTINUE

C
C   ACTUALIZACION DEL TIEMPO
C
TIME=TIME+DT
WRITE(6,*)'TIEMPO=',TIME
IF (TIME.GE.TMAX) GOTO 500
C
C   CONDICIONES BASE
C   SI EL INTERVALO SELECCIONADO ES MENOR QUE DX/C, ENTONCES SE
C   REALIZA UNA INTERPOLACION LINEAL
DO 70 I=1,NTUBO
DO 72 J=2,N(I)+1
QR(I,J)=Q(I,J)-(DT/DT0(I))*(Q(I,J)-Q(I,J-1))
HR(I,J)=H(I,J)-(DT/DT0(I))*(H(I,J)-H(I,J-1))
CP(I,J)=HR(I,J)+B(I)*QR(I,J)
BP(I,J)=B(I)+R(I)*ABS(QR(I,J))
72  CONTINUE
DO 74 J=1,N(I)
QS(I,J)=Q(I,J)-(DT/DT0(I))*(Q(I,J)-Q(I,J+1))
HS(I,J)=H(I,J)-(DT/DT0(I))*(H(I,J)-H(I,J+1))
CM(I,J)=HS(I,J)-B(I)*QS(I,J)
BM(I,J)=B(I)+R(I)*ABS(QS(I,J))
74  CONTINUE
70  CONTINUE
C

```

```

C   CALCULO DE CONDICIONES AL FINAL DEL PROXIMO INTERVALO DE
C   TIEMPO
C
C   PUNTOS INTERNOS
C
      DO 80 I=1,NTUBO
      DO 80 J=2,N(I)
      HH(I,J)=(CP(I,J)*BM(I,J)+CM(I,J)*BP(I,J))/(BP(I,J)+BM(I,J))
      IF (HH(I,J).LE.HVAP) HH(I,J)=HVAP
      QQ(I,J)=(CP(I,J)-CM(I,J))/(BP(I,J)+BM(I,J))
80   CONTINUE
C
C   CONDICION DE BORDE TANQUE
C
      DO 82 I=1,NTUBO
      IF (NENT(I).EQ.0) HH(I,1)=HUPRES(I)
      IF (NEXT(I).EQ.0) HH(I,N(I)+1)=HRES(I)
      IF (NENT(I).EQ.0) QQ(I,1)=HH(I,1)/BM(I,1)
      1-CM(I,1)/BM(I,1)
      IF (NEXT(I).EQ.0) QQ(I,N(I)+1)=-HH(I,N(I)+1)/BP(I,N(I)+1)
      1+CP(I,N(I)+1)/BP(I,N(I)+1)
82   CONTINUE
C
C   CONDICION DE BORDE NODO
C
      S1=0.0
      S2=0.0
      S3=0.0
      S4=0.0
      DO 90 K=1,NJ
      DO 92 L=1,NTE(K)
      S1=S1+CP(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)/BP(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)
      S2=S2+1.0/BP(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)
92   CONTINUE
      DO 94 M=1,NTS(K)
      S3=S3+CM(NJS(K,M),1)/BM(NJS(K,M),1)
      S4=S4+1.0/BM(NJS(K,M),1)
94   CONTINUE
      DO 96 L=1,NTE(K)
      HH(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)=(S1+S3)/(S2+S4)
      HN(K)=HH(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)
      IF (HH(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1).LE.HVAP) HH(NJE(K,L),
      1N(NJE(K,L))+1)=HVAP
      QQ(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)=(CP(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)
      1-HH(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1))/BP(NJE(K,L),N(NJE(K,L))+1)
96   CONTINUE
      DO 98 M=1,NTS(K)

```

```

HH(NJS(K,M),1)=HN(K)
QQ(NJS(K,M),1)=(HH(NJS(K,M),1)-CM(NJS(K,M),1))/BM(NJS(K,M),1)
98 CONTINUE
90 CONTINUE
C
C  CONDICION DE BORDE VALVULA DE SALIDA O EXTREMO CERRADO
C
DO 110 I=1,NTUBO
IF (NEXT(I).EQ.2) GOTO 110
IF (NEXT(I).EQ.0) GOTO 110
IF (NEXT(I).NE.1) GOTO 130
C
C  DETERMINACION COEFICIENTE DESCARGA DE LA VALVULA
C
DO 112 K=2,NPTS(I)
IF (TIME.GE.TIMD(I,K-1).AND.TIME.LT.TIMD(I,K)) GOTO 125
112 CONTINUE
125 TAU=TAUD(I,K-1)+(TAUD(I,K)-TAUD(I,K-1))*(TIME-TIMD(I,K-1))/
1(TIMD(I,K)-TIMD(I,K-1))
IF (TAU.LT.0.0001) GOTO 130
CVP(I)=0.5*Q0(I)**2/H0(I)
CV=TAU**2*CVP(I)
QQ(I,N(I)+1)=-CV*BP(I,N(I)+1)+SQRT(CV**2*BP(I,N(I)+1)**2
1+CV*CP(I,N(I)+1)*2.0)
HH(I,N(I)+1)=CP(I,N(I)+1)-BP(I,N(I)+1)*QQ(I,N(I)+1)
GOTO 110
130 CONTINUE
C
C  VALVULA CERRADA O EXTREMO CERRADO
C
IF (NEXT(I).EQ.3.OR.TAU.LT.0.0001) GOTO 131
GOTO 110
131 QQ(I,N(I)+1)=0.0
HH(I,N(I)+1)=CP(I,N(I)+1)
IF (ORV(I).EQ.1.AND.HH(I,N(I)+1).GT.HAORV(I)) GOTO 171
GOTO 172
171 CVORV(I)=0.5*QORV(I)**2/HORV(I)
QQ(I,N(I)+1)=-CVORV(I)*BP(I,N(I)+1)
1+SQRT(CVORV(I)**2*BP(I,N(I)+1)**2
2+CVORV(I)*CP(I,N(I)+1)*2.0)
HH(I,N(I)+1)=CP(I,N(I)+1)-BP(I,N(I)+1)*QQ(I,N(I)+1)
172 CONTINUE
IF (VOL(I).GT.0.0) GOTO 132
IF (HH(I,N(I)+1).LE.HVAP) GOTO 132
GOTO 110
132 HH(I,N(I)+1)=HVAP
QQ(I,N(I)+1)=(CP(I,N(I)+1)-HVAP)/BP(I,N(I)+1)

```

```

      VOL(I)=VOL(I)-0.5*DT*(QQ(I,N(I)+1)+Q(I,N(I)+1))
      IF (VOL(I).LE.0.0) VOL(I)=0.0
110  CONTINUE
C
C   ASIGNACION DE LOS VALORES BASES PARA EL PROXIMO
C   INTERVALO DE TIEMPO
      DO 151 I=1,NTUBO
      DO 151 J=1,N(I)+1
      H(I,J)=HH(I,J)
      HX(I,J)=H(I,J)
      Q(I,J)=QQ(I,J)
151  CONTINUE
      GOTO 100
500  CONTINUE
      CLOSE(3)
      CLOSE(10)
      CLOSE(11)
      CLOSE(12)
      CLOSE(13)
      CLOSE(14)
      CLOSE(15)
      CLOSE(16)
      CLOSE(17)
      CLOSE(18)
      CLOSE(19)
      CLOSE(20)
      CLOSE(21)
      CLOSE(22)
      CLOSE(23)
      CLOSE(24)
      CLOSE(25)
      END

```

APÉNDICE B: Extracto Norma ASME/ANSI B16.5

TABLES 2
PRESSURE-TEMPERATURE RATINGS FOR
GROUPS 1.1 THROUGH 3.16 MATERIALS

TABLE 2-1.1 RATINGS FOR GROUP 1.1 MATERIALS

Nominal Designation	Forgings	Castings	Plates
C-SI	A 105 (1)	A 216 Gr. WCB (1)	A 515 Gr. 70 (1)
C-Mn-SI	A 250 Gr. LF2 (1)		A 516 Gr. 70 (1)(2) A 537 CL 1 (3)

NOTES:

- (1) Upon prolonged exposure to temperatures above 800°F, the carbide phase of steel may be converted to graphite. Permissible, but not recommended for prolonged use above 800°F.
- (2) Not to be used over 850°F.
- (3) Not to be used over 750°F.

WORKING PRESSURES BY CLASSES, psig

Class Temp., °F	150	300	400	600	900	1500	2500
-20 to 100	285	740	990	1480	2220	3785	6170
200	260	675	900	1350	2025	3375	5625
300	230	605	815	1215	1810	3080	5070
400	200	535	745	1120	1600	2710	4580
500	170	460	650	1000	1495	2565	4390
600	140	385	570	895	1340	2275	3860
650	125	335	515	805	1210	2065	3475
700	110	285	455	715	1085	1865	3140
750	95	235	395	625	960	1660	2810
800	80	185	335	535	835	1460	2480
850	65	135	275	445	745	1260	2150
900	50	85	175	295	495	860	1430
950	35	35	70	140	205	310	515
1000	20	20	50	70	105	165	270

APÉNDICE C: Ejemplo 3-1 del libro “Fluid Transients in System”

3-4 Single-pipeline Applications

The procedure to solve a transient fluid flow problem numerically involves a number of repetitive calculations. A computer program to solve a problem involving a single pipe leading from a reservoir to a valve (Fig. 3-4) has the following elements:

1. Read in values of data that describe the system and the character of the particular transient.
2. Calculate constants and initial steady-state conditions, and store initial values of Q_0 and H_0 for $t = 0$.
3. Print out values of Q_0 and H_0 at each section, plus primous time and valve opening.
4. Increment time by $2\Delta t$, and at intermediate time Δt calculate interior points at even-numbered sections Q_2, H_2 to Q_N, H_N .
5. Calculate interior points at odd-numbered sections Q_1, H_1 to Q_{N-1}, H_{N-1} , and then calculate the boundary values $Q_0, H_0, Q_{NS},$ and H_{NS} .
6. Transfer back to the print statement (No. 3), or to increment time (No. 4), and check to see if T_{max} , the duration of the transient, has been exceeded. If not, continue with the calculations.



Figure 3-4 Single pipeline.

Example 3-1

The valve closure relationship for the pipeline shown in Fig. 3-4 is given by the equation

$$t = t_0 - (t_0 - t_1) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1.5}$$

in which t_0 is the time of operation, t_1 the initial value of valve opening, and t_2 the final value. The steady-state open position of the valve is defined by a value of $(C_1 A_0)_0$ in Eq. (3-35). The initial valve opening may be zero or any positive number. In this case $t_1 = 1$. The input data for the problem are: $L = 600$ m, $a = 1200$ m/s, $D = 0.5$ m, $f = 0.018$, $H_0 = 150$ m, $t_0 = 2.1$ s, $t_1 = 1$, $t_2 = 0$, $T_{max} = 4.3$ s, $K_{20} = 0.75$, $(C_1 A_0)_0 = 0.009$, $\epsilon = 9.806$ m/s², and $N = 10$.

Figure D-1 in Appendix D presents a FORTRAN listing of a program for use with MS-DOS on a PC to solve for the pressure head and flow response as a result of a specified valve motion. The input data are listed at the end of the program and are read from a separate file named SINGLE.DAT. In addition to all input data listed above, two new parameters are included. These are IPR, a control parameter that controls the number of time increments, $\Delta T = 2\Delta t$, between each primous of calculated results, and IGRAPH, a section number at which pressure head data are stored for later graphing if desired.

Sec. 3-4 Single-pipeline Applications

Steady-state discharge, Q_0 , is calculated in the program to balance the pipe friction and valve losses corresponding to $(C_1 A_0)_0$ with the energy available in the reservoir. The initial flow, Q_0 , for the specific problem is calculated for the given initial valve opening, ϵ .

The computer output is shown in Fig. D-1b, and a graphical display of head at the valve, discharge at the reservoir, and valve opening as a function of time are shown in Fig. 3-5.

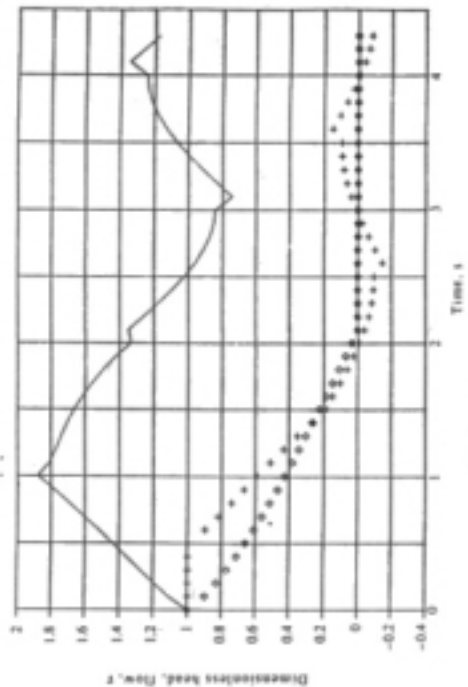


Figure 3-5 Response is single pipeline due to valve closure.

Included in the FORTRAN program is a collection of variables to store transient information to graph if desired. These data are stored in the file attached to device B. They include the initial pipe profile and hydraulic grade line, transient head profiles along the pipeline at each successive pair of time steps, and a time history of pressure head at section IGRAPH. A separate program written in BASIC for the IBM PC is provided in Fig. D-2, Appendix D, to read and graph these data with IBM GRAPHICS. It is a fairly primitive and simple graphics package and is provided only as a useful tool to examine transient results, not as an exposition of recommended graphic displays. The same program, called IGRAPH, will be available for use by other programs in this book.

Example 3-2

Consider a single horizontal pipeline as shown in Fig. 3-4 with the valve closed at the downstream end. Assume that a series of sinusoidal waves passes over the reservoir