

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA

RESPUESTA TRANSITORIA DEL FLUJO AL CIERRE DE UNA VÁLVULA EN UNA  
RED DE TUBERÍAS. UN ENFOQUE NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL

Trabajo de Grado presentado a la ilustre  
Universidad central de Venezuela para  
optar al título de Magíster Scientiarum  
en Ingeniería Hidráulica

AUTOR: Ing. Denis Montalbán

Caracas, Abril de 2004.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, María Isabel...

A mi esposa, Iris Violeta...

A mis hijos, Rafael Andrés

y Laura Denisse.

## **RECONOCIMIENTOS**

Este trabajo fue posible gracias  
a la valiosa colaboración de:

Ing. Francisco Reynaldo García

Ing. Pedro Solana

Ing. Enrique García

A quienes les estoy muy agradecido.

## INDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA	i
RECONOCIMIENTO	ii
ÍNDICE	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROBLEMA	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVO GENERAL	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 ACTIVIDADES PARA ALCANZAR LOS OBJETIVOS	4
1.5 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO	5
2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	6
2.1 EL CONCEPTO DE MODELO	6
2.2 FLUJO ESTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS	8
2.3 TRATAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN RÉGIMEN ESTABLE	9
2.4 EL MODELO ANALÍTICO ESTABLE	12
2.5 EL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	14
2.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PARA RÉGIMEN ESTABLE, BASADO EN EL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	21

2.7 PROGRAMA EN FORTRAN PARA CALCULAR LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES Y LAS PRESIONES NODALES EN RÉGIMEN ESTABLE	23
2.8 DESCRIPCIÓN FÍSICA SIMPLIFICADA DEL GOLPE DE ARIETE	23
2.9 TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN SISTEMAS COMPLEJOS	30
2.10 LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	31
2.11 ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO	35
2.12 EL MODELO ANALÍTICO TRANSITORIO	39
2.13 EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS	41
2.14 LA SOLUCIÓN NUMÉRICA	43
2.15 SELECCIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO	47
2.16 TRATAMIENTO DE LA FRICCIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO	49
2.17 CONDICIONES DE BORDE	50
2.18 UNIÓN DE TRES TUBERÍAS	51
2.19 PÉRDIDAS DE CARGA SIGNIFICATIVAS EN TUBERÍAS EN SERIE	55
2.20 DINÁMICA DE LAS VÁLVULAS	59
2.21 VÁLVULA EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO DE UNA TUBERÍA QUE ENTRA A UN TANQUE	60
2.22 UNIÓN DE TRES TUBERÍAS, UNA ENTRANTE CON VÁLVULA Y DOS SALIENTES, CON DEMANDA DE CAUDAL CONSTANTE	63
2.23 NODO CON 3 TUBOS, 1 ENTRANTE CON VÁLVULA Y 2 SALIENTE	66

	Página
2.24 NODO CON 3 TUBOS, 2 ENTRANTES CON VÁLVULAS Y 1 SALIENTE	70
2.25 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA RÉGIMEN TRANSITORIO, BASADO EN EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS	73
2.26 PROGRAMA EN FORTRAN PARA EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS	73
2.27 INSPECCIÓN DEL PROGRAMA	73
2.28 DEFINICIÓN DE COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN	80
3. EL MODELO EXPERIMENTAL	89
3.1 METODOS, TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	89
3.1.1 QUE ES Lab VIEW?	90
3.1.2 PROGRAMAS EN LabVIEW 6.0 PARA LA ADQUISICIÓN Y GRAFICACIÓN DE DATOS DE PRESIÓN	91
3.1.3 OPERACIÓN DEL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN “MAX”	96
3.1.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN	99
3.1.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL	102
3.1.6 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN	103
3.1.7 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL	104

	Página
3.1.8 CONDICIONES AMBIENTALES Y PROPIEDADES DEL AGUA	106
3.2 DETERMINACIÓN DE $K_L$	106
4 RESULTADOS	112
4.1 RESULTADOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN ESTABLE	112
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA RÉGIMEN ESTABLE	117
4.3 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	121
4.3.1 SENSIBILIDAD RESPECTO A LA VELOCIDAD DE LA ONDA $a_i$	121
4.3.2 SENSIBILIDAD RESPECTO AL FACTOR DE FRICCIÓN $f_i$ Y AL COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE CARGA $\Sigma K_i$	126
4.4 RESULTADOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN TRANSITORIO	135
4.5 RESULTADOS GRÁFICOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN TRANSITORIO VERSUS RESULTADOS GRÁFICOS EXPERIMENTALES	140
4.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	147
5. LIMITACIONES	151
6. CONCLUSIONES	152
7. RECOMENDACIONES	153
8. BIBLIOGRAFÍA	154

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PAG.
N°	
1 La Red #1	3
2 El Método de Newton-Raphson	15
3 Diagrama de Flujo del Programa Principal para Régimen Estable	21
4 Diagrama de Flujo de la Subrutina “Cálculo de Caudales”	22
5 Sistema tanque-tubería-válvula para la descripción del golpe de ariete	24
6 Propagación de la onda de presión en una tubería simple	25
7 Altura de presión vs.tiempo en tres ubicaciones a lo largo de la tubería	28
8 Esquema para la deducción de las ecuaciones gobernantes para Flujo transitorio unidimensional en tuberías	32
9 Interpolación de H y V en una malla $\Delta x - \Delta t$	44
10 Unión de tres tuberías, una entrando y dos saliendo	51
11 Unión de tres tuberías, dos entrando y una saliendo	54
12 Unión de tres tuberías con demanda de flujo constante	55
13 Modelo para las pérdidas significativas en tuberías	58
14 Válvula en el extremo aguas debajo de una tubería que descarga a un tanque	62
15 Unión de tres tuberías, una entrante con válvula y dos salientes, con caudal de demanda constante	64
16 Condición de borde de nodo con 3 tubos, 1 entrante con válvula y 2 salientes	66
17 Condición de borde de nodo con 3 tubos, 2 entrantes con válvula y 1 saliente	70
18 Diagrama de flujo del programa principal para régimen transitorio	74
19 Sentido de los caudales estables en el nodo 2	76

FIGURA	PAG.
N°	
20 Las características como líneas de transmisión de información	81
21 Sistema de tuberías en serie	85
22 Nodo de unión genérico	88
23 Panel frontal del VI de adquisición de datos de presión	92
24 Panel frontal del VI de graficación de datos de presión	93
25 Generador de presiones	96
26 Plano del generador de presiones	97
27 Sistema de adquisición de datos de presión	103
28 Medidor ultrasónico de caudal	105
29 Válvula Generadora de Transitorios	109
30 Plano de la válvula generadora de transitorios	110
31.a Estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $a_i$	124
32.a Estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $\Sigma K_i$	129
33.a Estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $f_i$	131

FIGURA	PAG.
N°	
34.a Estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $f_i$ y $\Sigma K_i$	133
31.b Resultado final del estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $a_i$	125
32.b Resultado final del estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $\Sigma K_i$	130
33.b Resultado final del estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $f_i$	132
34.b Resultado final del estudio de sensibilidad de la onda de presión generada por el modelo, respecto a la variación de $f_i$ y $\Sigma K_i$	134
35 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 9 (teórica y medida)	141
36 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 3 (teórica y medida)	142
37 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 1 (teórica y medida)	143
38 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 6 (teórica y medida)	144
39 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 5 (teórica y medida)	145
40 Gráfica presión vs. tiempo en nodo 4 (teórica y medida)	146

## LISTA DE TABLAS

TABLA	PAG.
N°	
1 Caudales Supuestos para la Red #1	12
2 Velocidades Transitorias en el Nodo 2	77
3 $(P/\gamma)_{\text{modelo}}$ a los 47,984 seg. y $(P/\gamma)_{\text{experiment}}$	79
4 Tiempos Cierre de la Válvula de Bola	108
5 Resultados del Ensayo de la Válvula de Bola	111
6 Archivo de resultados “Newtonra.out” del programa para régimen estable	113
7 Archivo de datos “Newtonra.dat” para el programa de régimen estable	115
8 Archivo de interfase “Newtonra.res” entre el programa de régimen estable y el de régimen transitorio	116
9 Caudales medidos en régimen estable	118
10 Presiones nodales medidas en régimen estable	119
11 Descripción del estado operacional de la red #1 en régimen estable	120
12 Variación del factor C que modifica a $a_i$	123
13 Variación del factor B que modifica $\Sigma K_i$	127
14 Variación del factor A que modifica a $f_i$	127
15 Variación de los factores A y B que modifican en igual proporción a $\Sigma K_i$ y $f_i$ simultáneamente	128
17 Archivo de datos “Transnet.dat” para el programa de régimen transitorio	135
18 Archivo de resultados numéricos “Transnet.out” para el programa de régimen transitorio	136
19 Comparación de las presiones teóricas y medidas en régimen estable	148
20 Comparación de los caudales teóricos y medidos en régimen estable	149

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO		PAG.
N°		
1	Códigos fuentes de los VI de adquisición y graficación de datos	170
2	Resultados del modelo transitorio para el nodo 2	173
3	Programa para redes en régimen estable	176
4	Programa para redes en régimen transitorio	177
5	Diagrama de flujo de la subrutina “Condiciones de Borde”	178

## SIMBOLOGÍA

$a$  : es la velocidad de propagación de las perturbaciones en las magnitudes del flujo.

$D$ : es el diámetro interior de la tubería.

$f$  : es el factor de fricción de Darcy

$g$ : es la aceleración de gravedad

$H$  : es la altura piezométrica ( $p/\gamma + z$ )

$H_{rp}$ : es la pérdida de carga por rozamiento en tubería

$H_{rs}$ : es la pérdida de carga por rozamiento en accesorio

$k$ : es la rugosidad absoluta.

$K$ : es el coeficiente de pérdida de carga.

$L$ : es la longitud de la tubería.

$n$  : es el exponente que depende del modelo utilizado para evaluar  $h_f$ .

$Q$  : es el caudal a través de la tubería.

$Re$ : es el número de Reynolds.

$r$  : es la resistencia de la tubería.

$t$  : es el tiempo

$V$ : es Velocidad media del flujo.

$x$  : es la coordenada longitudinal

$\frac{\partial z}{\partial x}$ : es el  $\text{sen}\theta$

$\theta$  : es el ángulo de inclinación de la tubería

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA**

**RESPUESTA TRANSITORIA DEL FLUJO AL CIERRE DE UNA VÁLVULA EN  
UNA RED DE TUBERÍAS. UN ENFOQUE NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL**

**TUTOR:** FRANCISCO REYNALDO GARCÍA  
**AUTOR:** DENIS MONTALBAN  
**AÑO:** 2004

**RESUMEN**

En el presente trabajo se propone un modelo para simular el flujo transitorio en redes de tuberías.

El mismo se limita a resolver simultáneamente las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de la masa, para flujo unidimensional no permanente en tuberías.

La solución obtenida considera tanto la compresibilidad del fluido como la elasticidad de la tubería, y supone el factor de fricción “ $f$ ” de Darcy como cuasi-estacionario.

Se usó el método de Newton-Raphson para calcular la distribución de caudales y las presiones nodales iniciales en la red. Se empleó el método de las características para resolver numéricamente el régimen de flujo transitorio.

Los resultados numéricos fueron validados experimentalmente. Para tal fin se construyó una red en el Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV y se hicieron las mediciones de caudal y presión tanto en régimen de flujo estable como en régimen transitorio.

Finalmente, se compararon los resultados experimentales con los numéricos y se concluyó que los mismos concuerdan bastante bien.

## INTRODUCCIÓN

Basado en una red de tuberías existente en el Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV, denominada Red #1, el presente trabajo investiga el comportamiento transitorio de las presiones nodales, inmediatamente después de iniciarse el cierre de una válvula ubicada en el nodo 1.

En el mismo se utiliza el método de las características para resolver numéricamente, las ecuaciones de Conservación de Cantidad de Movimiento y de Conservación de la Masa, para flujo unidimensional no permanente en tuberías, considerando la compresibilidad del fluido y la elasticidad de la tubería. Para la descripción teórica del estado estable inicial de la red se utilizó el método de Newton-Raphson.

Los resultados numéricos fueron comparados con mediciones de presión en los nodos de dicha red, realizadas mediante un sistema de adquisición de datos.

La relevancia del estudio radica en que provee un modelo computacional para simular el flujo transitorio en una red de tuberías.

En el trabajo, primero se describe todo el marco conceptual relacionado con flujo transitorio en redes de tuberías. Seguidamente, se abordan tanto el aspecto metodológico como el tecnológico relacionado con la formulación del modelo y su validación experimental, y finalmente se presentan los resultados.

## 1. EL PROBLEMA

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Son numerosos los problemas que dentro del área específica de Flujo Transitorio en Redes de Tuberías, requieren la atención de los investigadores. Sin embargo, debido a la experiencia docente del autor en el área de Mecánica de los Fluidos, al interés tanto de la UNEXPO "Luis Caballero Mejías" como de la UCV, en el tema de transitorios, y debido a que ya existe en el Instituto de Mecánica de los fluidos de la UCV, una red construida en PVC para fines de investigación (la cual constituirá el modelo experimental y puede apreciarse en la figura 1), se optó por investigar el siguiente problema:

En la red de la figura 1, inicialmente circula agua en régimen permanente, ¿Cuál será el comportamiento transitorio de las presiones nodales, inmediatamente después de iniciarse el cierre de una válvula de bola ubicada en el nodo 1?

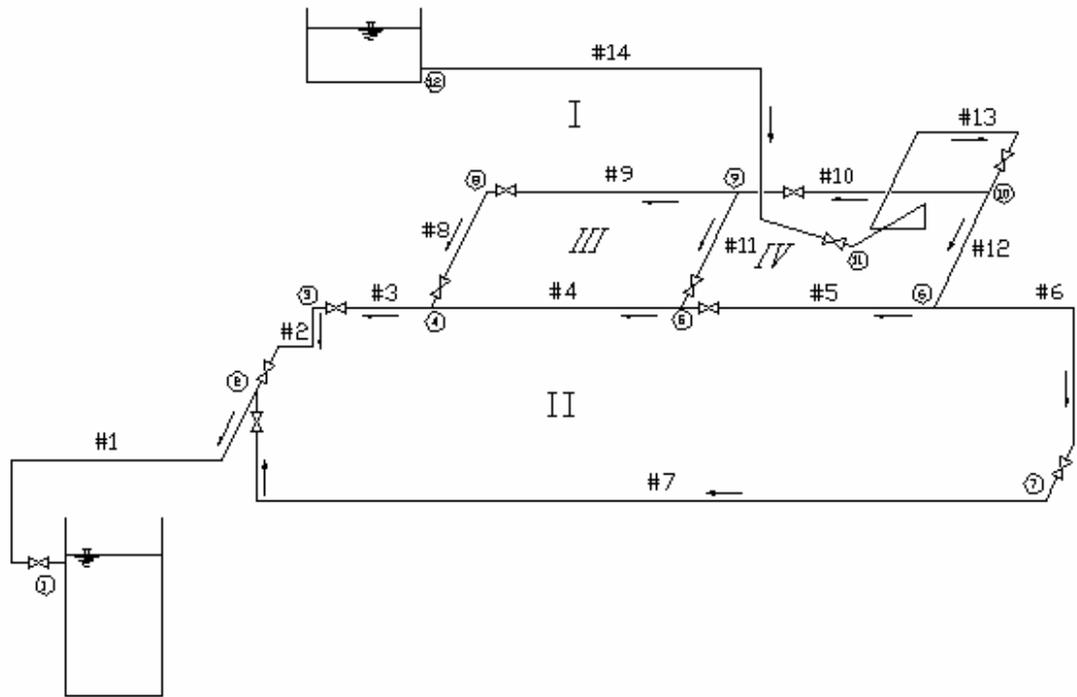


Figura 1. La Red #1

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar la evolución transitoria de la presión en los nodos, utilizando métodos numéricos. Luego, comparar estas predicciones con resultados experimentales.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar un modelo de simulación de flujo transitorio en redes de tuberías.
- Medir las fluctuaciones de presión que se generan en el modelo experimental como consecuencia del cierre de una válvula en el nodo 1.
- Comparar los resultados numéricos con los experimentales.

### 1.4 ACTIVIDADES PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS

1. Revisar la bibliografía relacionada con el tema.
2. Formular analíticamente el problema.
3. Seleccionar una técnica apropiada para resolver numéricamente el modelo analítico de dos ecuaciones diferenciales: continuidad y momentum.
4. Diseñar el algoritmo.
5. Diseñar el programa.
6. Probar el programa
7. Acondicionar la Red #1 (arreglo experimental existente).
8. Hacer las mediciones.
9. Correr el programa con los datos de dicha red.
10. Comparar los resultados numéricos con los experimentales.

## 1.5 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

El estudio es relevante porque:

- Permite predecir la respuesta del flujo al cerrar una válvula en una red de tuberías.
- Permite verificar experimentalmente el modelo teórico de dos ecuaciones (continuidad y cantidad de movimiento), con mediciones de presión transitoria en los nodos.
- Aporta una herramienta basada en Fortran, para modelar el comportamiento transitorio de las presiones nodales en una red de tuberías.
- Aporta también una herramienta basada en LabView, para adquirir y procesar la data de presión transitoria.

## 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 2.1 EL CONCEPTO DE MODELO

La palabra modelo denota una variedad de conceptos ( Stachowiak, 1973). Es usado para hacer referencia a aquello que se imita; también para referirnos a una reproducción a escala de un edificio, máquina, etc., que usualmente sirve como ilustración (conocidas comúnmente como maquetas); También se usa para denotar tipo, categoría o variedad particular de algo (modelo de automóvil, de máquina, etc.); modelo significa además, toda estructura lógica o matemática que se utiliza en la ciencia para dar razón de un conjunto de fenómenos que guardan entre sí ciertas relaciones. Cuando se habla de un modelo matemático, se hace referencia a una representación matemática de un fenómeno físico, económico, humano, etc., realizada con el fin de poder estudiarlo mejor.

A pesar de las diferentes acepciones del termino modelo, se puede afirmar que una cosa no puede ser un modelo por sí misma, sino que llegará a ser un modelo solo si se relaciona con algo más (el objeto que está modelando).

A los fines del presente trabajo, se van a usar las siguientes tres definiciones de modelo:

*Modelo Matemático:* describe la conducta intrínseca y las condiciones singulares de un sistema estudiado, a través de una relación matemática entre variables físicas (frecuentemente una ecuación diferencial).

*Modelo Computacional:* un sistema de relaciones algebraicas basadas en el modelo matemático o en una de sus transformaciones, adaptable directamente para la ejecución de los cálculos numéricos.

*Modelo Físico:* un arreglo experimental adecuado para ajustar y medir los parámetros definidos por una transformación de similitud del modelo matemático.

Las operaciones demandadas por el modelo computacional, son programadas en un computador. Este procedimiento es algunas veces llamado modelaje computacional.

El fenómeno que tiene lugar en el modelo y en el objeto modelado ( el original), son similares bajo algunas condiciones bien definidas.

El modelaje es el proceso por el cual el sistema original es reemplazado por un sistema similar ( el modelo) y los fenómenos en el modelo son estudiados para inferir los fenómenos que tienen lugar en el original. Es decir, modelar es sustituir un fenómeno original por otro con el fin de estudiarlo.

## 2.2 FLUJO ESTABLE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS

En la práctica, la mayor parte de los sistemas que transportan fluidos están formados por un conjunto de tuberías interconectadas en puntos o nodos, las cuales constituyen una red. El caudal que circula por un tramo de una red, puede estar constituido por la adición de varios caudales pertenecientes a circuitos diversos. Igualmente, un caudal dado puede dividirse y alimentar varios tramos.

Para realizar un análisis de una red en estado estable, es necesario calcular la distribución de caudales en los diversos tramos y también las presiones nodales. La solución de esta clase de problemas suele ser laboriosa, por lo que se recurre a técnicas computacionales para resolverlos.

Entre los casos que exigen un análisis de red se pueden mencionar los siguientes :

1. Modificaciones de los sistemas de distribución de fluidos.
2. Evaluación del efecto de los caudales agregados a un sistema en operación.
3. Diseño de nuevos sistemas de distribución de fluidos.

Entre los métodos para analizar redes en régimen estable, se pueden mencionar : el método de Newton-Raphson, el método de Hardy Cross y el método de la Teoría Lineal,

entre otros. En la parte estable del presente trabajo se aplicará el método de Newton-Raphson.

En las redes de fluidos se cumplen dos leyes similares a las de Kirchoff para sistemas eléctricos, las cuales son :

1. La suma de los caudales que llegan a un nodo dado es igual a la suma de los caudales que salen de dicho nodo.(esta es una forma de enunciar la Ley de Continuidad).
2. La suma algebraica de las pérdidas de carga en un circuito cerrado de una red debe ser nula.(este es un balance energético que se debe realizar en cada malla o circuito).

Ambas leyes se cumplen bajo el supuesto de que las variables no dependen del tiempo.

### 2.3 TRATAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN RÉGIMEN ESTABLE

Como es bien sabido, las pérdidas de carga en flujo estable en tuberías, se pueden estimar mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_{rp} = \frac{fL}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

Donde:

$H_{rp}$ : Pérdidas de carga

$f$ : Factor de fricción.

$L$ : Longitud de la tubería.

$D$ : Diámetro de la tubería.,

$V$ : Velocidad media del flujo.

$g$ : Aceleración de gravedad.

Para calcular el factor de fricción estable “ $f$ ” se usará la ecuación obtenida por Churchill (1977), para flujo laminar, de transición o turbulento. Esta ecuación es:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + (B_1 + B_2)^{-3/2} \right]^{1/12} \quad (4)$$

donde  $B_1$  y  $B_2$  son:

$$B_1 = \left\{ -2,457 \text{Ln} \left[ \left( \frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{k}{D} \right] \right\}^{16}$$

$$B_2 = \left( \frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16}$$

y en las cuales:

Re: Número de Reynolds.

k: Rugosidad absoluta.

D: Diámetro interior de la tubería.

Esta misma ecuación será extrapolada al régimen transitorio para actualizar el factor de fricción “f” a medida que varíe el número de Reynolds.

La pérdida de carga en los accesorios de tubería se determinará mediante:

$$H_{rs} = K \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

donde:

$H_{rs}$ : Pérdida de carga.

K: Coeficiente de pérdida de carga.

V: Velocidad media del flujo.

g: Aceleración de gravedad

Las pérdidas de carga totales  $h_{fi}$  en un tubo cualquiera “i” serán:

$$h_{fi} = \left( \frac{f_i L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \frac{V_i^2}{2g} = \left( \frac{f_i L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \frac{16Q_i^2}{\rho^2 D_i^4 2g}$$

Que puede ser expresada como:

$$hf_i = r_i Q_i^2 \quad (6)$$

Donde:

$$r_i = \left[ \frac{16}{\rho^2 D_i^4 2g} \left( \frac{f_i L_i}{D_i} + \sum K_i \right) \right]$$

#### 2.4 EL MODELO ANALÍTICO ESTABLE

Para poder determinar la distribución de caudales y las presiones nodales, mediante alguna técnica numérica como la de Newton-Raphson, es necesario suponer unos caudales iniciales  $Q'_i$  para cada tramo de la red (véase tabla 1). Al hacer esta suposición, se ha respetado la Ley de Continuidad.

TUBO	Q (Pie <sup>3</sup> /seg)
1	0,0754
2	0,0394
3	0,0394
4	0,0204
5	0,0106
6	0,0360
7	0,0360
8	0,0190
9	0,0190
10	0,0288
11	0,0098
12	0,0466
13	0,0754
14	0,0754

Tabla 1. Caudales Supuestos para la Red #1

Al hacer un balance energético en cada malla usando la ecuación 6 y aplicar la Ley de Continuidad en cada nodo, se genera el siguiente sistema de ecuaciones :

$$\text{Malla I : } r_{14}Q_{14}^2 + r_{13}Q_{13}^2 + r_{12}Q_{12}^2 + r_5Q_5^2 + r_4Q_4^2 + r_3Q_3^2 + r_2Q_2^2 + r_1Q_1^2 = (44,027 - 5,839) \text{ pié}$$

$$\text{Malla II : } -r_2Q_2^2 - r_3Q_3^2 - r_4Q_4^2 - r_5Q_5^2 + r_6Q_6^2 + r_7Q_7^2 = 0$$

$$\text{Malla III : } -r_8Q_8^2 - r_9Q_9^2 + r_{11}Q_{11}^2 + r_4Q_4^2 = 0$$

$$\text{Malla IV : } -r_{11}Q_{11}^2 - r_{10}Q_{10}^2 + r_{12}Q_{12}^2 + r_5Q_5^2 = 0$$

$$\text{Nodo 2 : } Q_2 + Q_7 = Q_1$$

$$\text{Nodo 3 : } Q_2 = Q_3$$

$$\text{Nodo 4 : } Q_4 + Q_8 = Q_3$$

$$\text{Nodo 5 : } Q_5 + Q_{11} = Q_4$$

$$\text{Nodo 6 : } Q_5 + Q_6 = Q_{12}$$

$$\text{Nodo 7 : } Q_6 = Q_7$$

$$\text{Nodo 8 : } Q_8 = Q_9$$

$$\text{Nodo 9 : } Q_9 + Q_{11} = Q_{10}$$

$$\text{Nodo 10 : } Q_{10} + Q_{12} = Q_{13}$$

$$\text{Nodo 11 : } Q_{14} = Q_{13}$$

Este es un sistema de ecuaciones no lineales que puede ser resuelto numéricamente.

Una vez obtenida la distribución de caudales, se pueden determinar fácilmente las presiones nodales, haciendo un balance energético entre los nodos aguas arriba y aguas abajo de cada tubo.

## 2.5 EL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Para la descripción del estado estable inicial de la red se aplicará el método de Newton-Raphson, que permitirá conocer la distribución de caudales y las presiones nodales.

El método de Newton-Raphson es una técnica numérica que permite resolver un sistema de ecuaciones no lineales. Este procedimiento ha sido amplia y eficazmente utilizado, y consiste en la determinación de una raíz aislada  $R$  (figura 2), de la función  $y = F(x)$ , por aproximaciones sucesivas de fórmulas de recurrencia del tipo :

$$a_2 = a_1 - \frac{F(a_1)}{F'(a_1)} \quad (7)$$

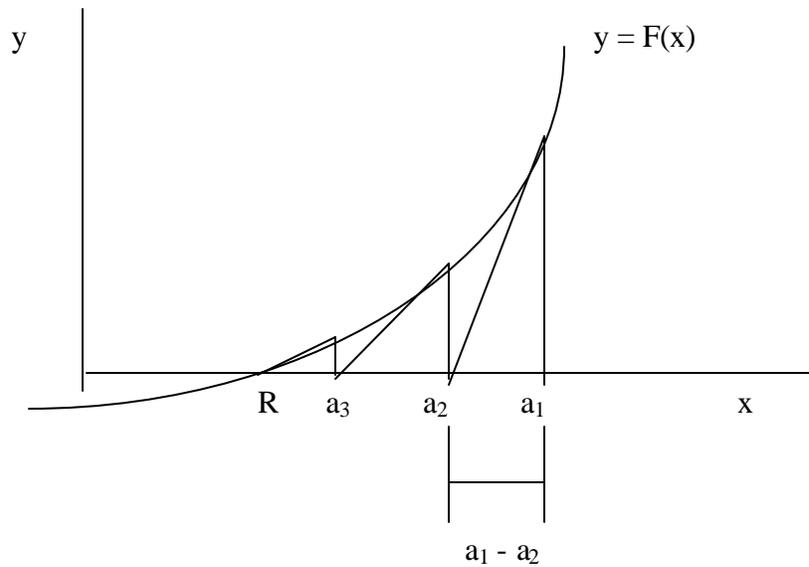


Figura 2. Método de Newton-Raphson

La fórmula de recurrencia (7) se obtiene de la serie de Taylor y es generalizada a un sistema de “n” ecuaciones con “n” incógnitas de la forma siguiente :

$$F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (8)$$

$$F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (9)$$

.....

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (10)$$

Las correcciones que mejoran la solución aproximada ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ), están determinadas por las “n” ecuaciones siguientes :

$$F_1(a_1, a_2, \dots, a_n) + \frac{\partial F_1}{\partial x_1} \delta a_1 + \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \delta a_2 + \dots + \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \delta a_n = 0 \quad (11)$$

$$F_2(a_1, a_2, \dots, a_n) + \frac{\partial F_2}{\partial x_1} \delta a_1 + \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \delta a_2 + \dots + \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \delta a_n = 0 \quad (12)$$

.....

$$F_n(a_1, a_2, \dots, a_n) + \frac{\partial F_n}{\partial x_1} \delta a_1 + \frac{\partial F_n}{\partial x_2} \delta a_2 + \dots + \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \delta a_n = 0 \quad (13)$$

O bien en arreglo matricial :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta a_1 \\ \delta a_2 \\ \cdots \\ \delta a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ -F_2 \\ \cdots \\ -F_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde se debe entender que las funciones  $F_n$  y sus derivadas se evalúan con la solución aproximada tentativa  $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ .

Nótese que el primer factor de ecuación (14), es la matriz jacobiana del sistema de ecuaciones. La resolución del sistema permite obtener las correcciones  $(\delta a_1, \delta a_2, \dots, \delta a_n)$  que mejoran el conjunto preliminar de soluciones  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ .

En redes de tuberías, las funciones  $F_n$  de las ecuaciones anteriores corresponden a los balances energéticos (uno por cada malla o circuito), y las correcciones ‘ $\delta a$ ’ a las correcciones de caudal ‘ $\delta Q$ ’, que de paso, deben tomarse únicas por cada malla, para preservar la continuidad en los nodos. La ecuación de pérdidas de carga ‘ $h_f$ ’, es conveniente expresarla de la forma :

$$h_f = rQ^n \quad (15)$$

donde :

$r$  : Resistencia de la tubería.

$n$  : exponente que depende del modelo utilizado para evaluar  $h_f$ .

$Q$  : Caudal a través de la tubería.

Para una malla o loop de “N” tramos, la función “F” será :

$$F = \sum_{i=1}^N r_i Q_i |Q_i|^{n-1} = 0 \quad (16)$$

Donde :

$r$  : Resistencia de la tubería

$Q$  : Caudal supuesto en la tubería.

$n$  : Exponente del gasto, dependerá del modelo utilizado

para evaluar la caída energética (con Darcy,  $n = 2$  ; con

Hazen-Williams,  $n = 1,852$  ; con Weymouth,  $n = 2$  ; con

Manning,  $n = 2$ )

En esta ecuación el valor absoluto se ha introducido para tomar en cuenta la dirección de los gastos. Al aplicarse esta ecuación tantas veces como loops se tengan en la red, se genera un conjunto de ecuaciones no lineales, con los caudales tentativos “ $Q_i$ ” de cada tubo como variables, que deben complementarse con las ecuaciones de continuidad en cada nodo, para obtener el sistema de ecuaciones que se va a resolver.

Por otra parte, la derivada parcial de F respecto a un caudal genérico  $Q_i$  será :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i} = r_i |Q_i|^{n-1} + r_i (n-1) Q_i |Q_i|^{n-2} \frac{\partial |Q_i|}{\partial Q_i} \quad (17)$$

Si  $Q_i$  es positivo,  $Q_i = |Q_i|$ ,  $\frac{\partial |Q_i|}{\partial Q_i} = +1$  y la ecuación anterior se puede escribir

como :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i} = r_i |Q_i|^{n-1} + r_i (n-1) |Q_i|^{n-2} |Q_i|$$

lo que es lo mismo :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i} = nr_i |Q_i|^{n-1} \quad (18)$$

Mientras que si  $Q_i$  es negativo,  $-Q_i = |Q_i|$ ,  $\frac{\partial |Q_i|}{\partial Q_i} = -1$ , y la ec. (17)

se transforma en :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i} = r_i |Q_i|^{n-1} + r_i (n-1) |Q_i|^{n-2} (-1) |Q_i| (-1)$$

lo que es lo mismo :

$$\frac{\partial F}{\partial Q_i} = nr_i |Q_i|^{n-1} \quad (19)$$

la cual es idéntica a la ecuación (18). Esta función evaluada con los Q tentativos de cada loop, genera los elementos del Jacobiano de cada loop.

En consecuencia, la ecuación de recurrencia (13) se escribe como :

$$F_n(Q_1', Q_2', \dots, Q_n') + nr_1 |Q_1'|^{n-1} \delta Q_1 + \dots + nr_n |Q_n'|^{n-1} \delta Q_n = 0 \quad (20)$$

de la cual puede obtenerse la corrección  $\delta Q$  y los gastos corregidos  $Q_{ci} = Q_i' + \delta Q$ . El conjunto de valores  $(Q_1', Q_2', \dots, Q_n')$  corresponden a los caudales en transito de la iteración anterior. Nótese que el caudal en un tramo común a dos mallas, estará sujeto a las dos correcciones que resulten de cada iteración. Si el método de Newton-Raphson se aplica a redes de varias mallas, las “n” ecuaciones “F” se resuelven simultáneamente, obteniéndose las correcciones  $(\delta Q_1, \delta Q_2, \dots, \delta Q_n)$  a aplicar a los caudales de los tramos en cada malla.

En el presente trabajo se utilizará el modelo de Darcy ( $n = 2$ ) para estimar las pérdidas por rozamiento en tubería, mientras que las pérdidas por accesorios se asumirán directamente proporcionales a la altura de velocidad.

## 2.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA RÉGIMEN ESTABLE, BASADO EN EL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.

El diagrama de flujo del programa principal para régimen estable se puede apreciar en la figura 3; mientras que el diagrama de flujo de la subrutina “Cálculo de Caudales” usada en el programa principal, está en la figura 4.



Figura 3. Diagrama de Flujo del Programa Principal para Régimen Estable

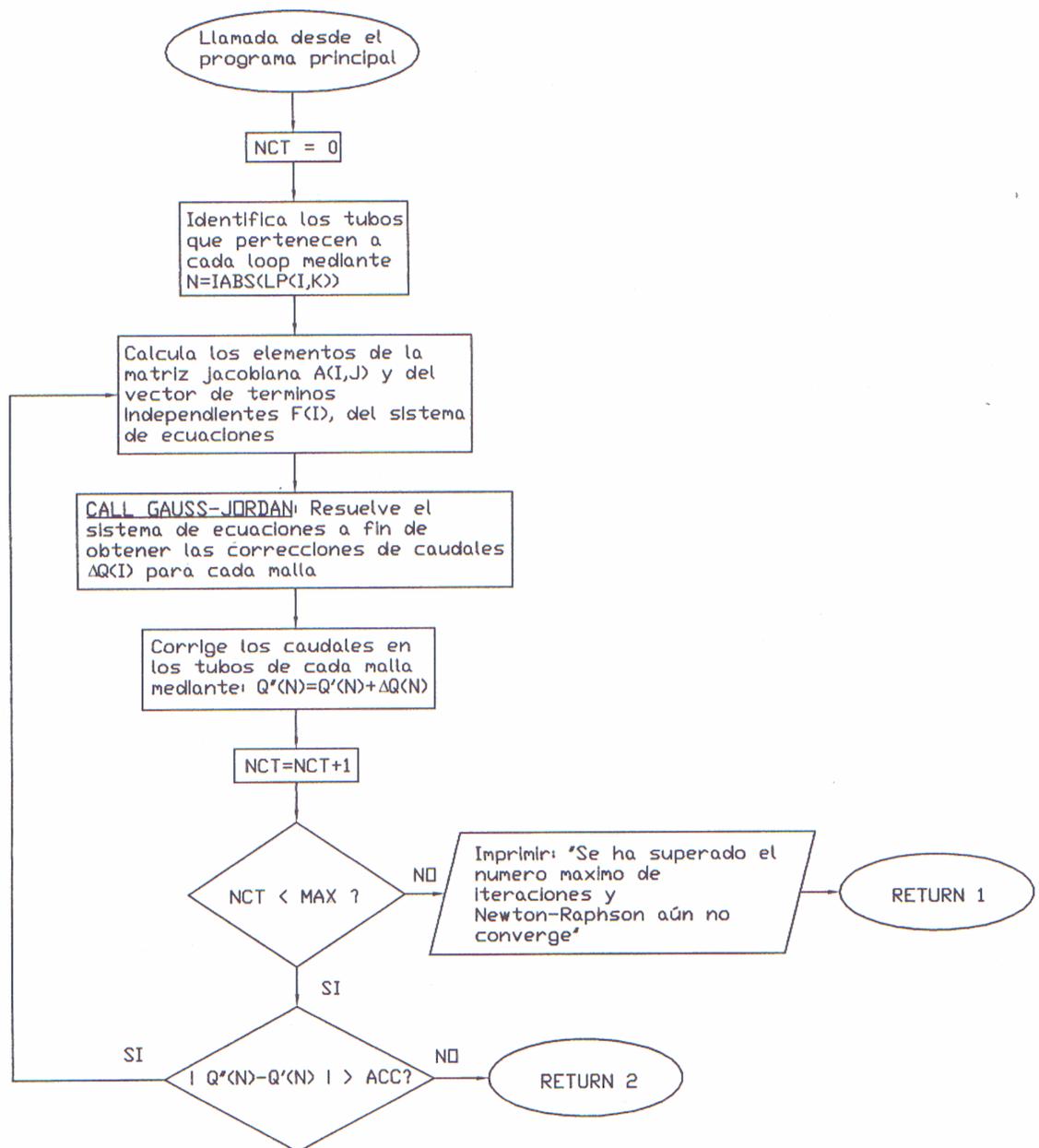


Figura 4. Diagrama de Flujo de la Subrutina “Cálculo de Caudales”

## 2.7 PROGRAMA EN FORTRAN PARA CALCULAR LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES Y LAS PRESIONES NODALES EN RÉGIMEN ESTABLE

Se usó el lenguaje Fortran para elaborar el programa de régimen estable. El código fuente de este programa está en el anexo 3 y contiene comentarios para ayudar a comprender el funcionamiento del mismo.

## 2.8 DESCRIPCIÓN FÍSICA SIMPLIFICADA DEL GOLPE DE ARIETE

En el presente trabajo el término “golpe de ariete” se refiere a las fluctuaciones de presión causadas por un cambio instantáneo de la velocidad del fluido (Chaudhry, 1979). La razón del nombre es que cuando una fuerte onda de presión pasa a través de un tubo, se genera un sonido que semeja al que se produce cuando un tubo es golpeado por un martillo.

Para tener una comprensión básica del comportamiento de un sistema de tuberías que transporta líquido bajo la acción de un golpe de ariete, es mejor considerar un sistema lo más sencillo posible. El sistema a considerar se muestra en la figura 5 y consiste de un tubo horizontal de diámetro constante que se extiende desde un tanque hasta un punto distante  $X$ , ubicado aguas abajo. Una válvula está ubicada a una distancia  $L$  desde el tanque. La fricción en la tubería se considerará despreciable para simplificar el análisis; y ya que las alturas de velocidades ( $V^2/2g$ ) son generalmente muy pequeñas comparadas con las alturas de presión del golpe de ariete ( $P/\gamma$ ), tampoco serán consideradas. El golpe de ariete será generado por el cierre súbito de la válvula. Inmediatamente después del cierre, habrá

modificaciones de las condiciones del flujo a ambos lados de la válvula, pero para el propósito de esta sección, bastará solo con observar lo que ocurre aguas arriba de la válvula. Al cerrar súbitamente la válvula, la velocidad del agua en la misma es forzada repentinamente a cero. Como una consecuencia, la altura de presión en la válvula se incrementa súbitamente en una cantidad  $\Delta H$  (véase figura 6). La magnitud de  $\Delta H$  es precisamente la cantidad de altura de presión necesaria para reducir a cero, el momentum del líquido que fluye inicialmente a través de la válvula a una velocidad  $V$ .

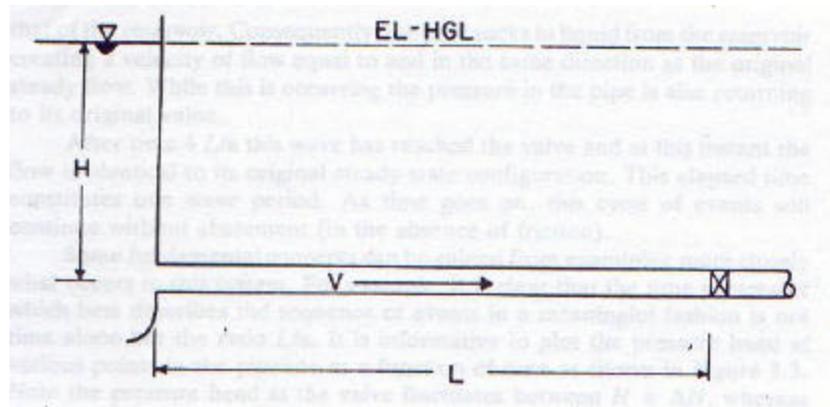


FIGURA 5. Sistema Tanque-Tubería- Válvula para la Descripción Simplificada del Golpe de Ariete.

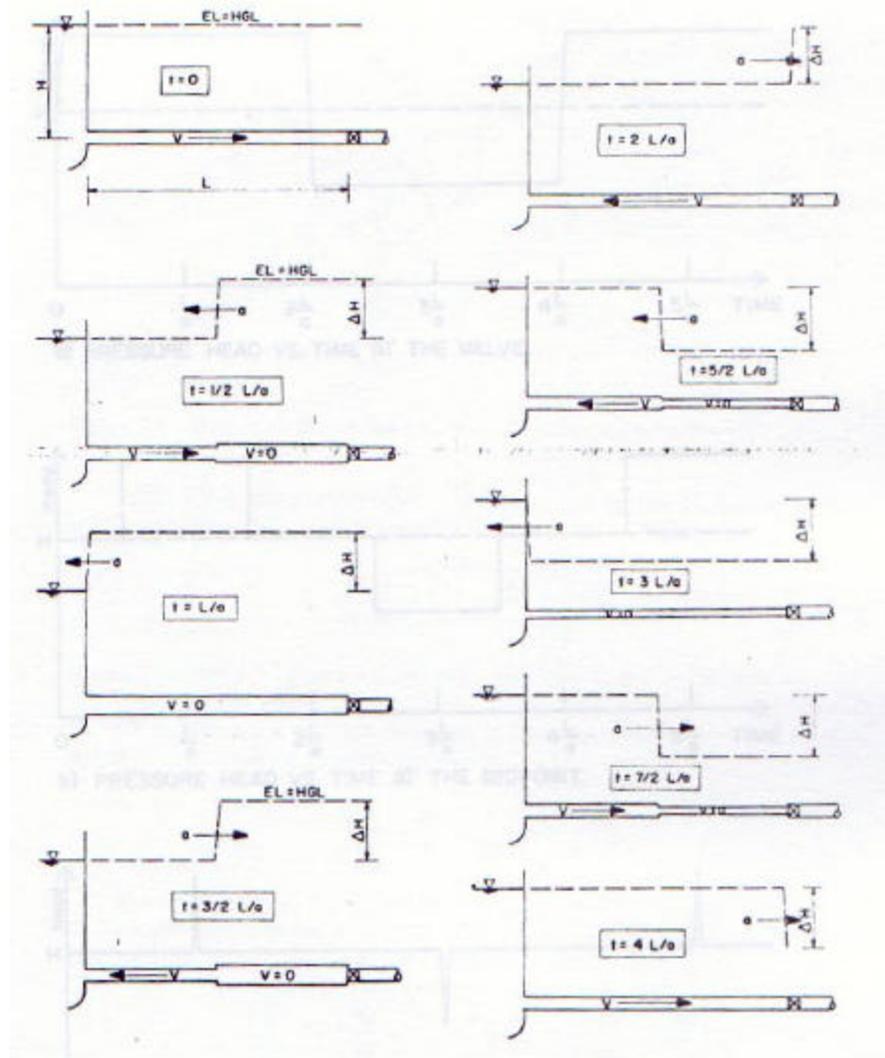


FIGURA 6. Propagación de la Onda de Presión en una Tubería Simple.

(tomado de la referencia bibliográfica 86)

El incremento brusco de la presión en la válvula causa una tensión violenta en la pared de la tubería y un incremento súbito de la densidad del líquido. La magnitud de estos cambios, dependen del tamaño de la tubería, del material y de la compresibilidad del líquido. Generalmente, para líquidos y materiales de tuberías comúnmente usados, el

cambio porcentual en la densidad es menor de 0,5%. Para los efectos de ilustración, en la figura 6, la deformación de la tubería ha sido intencionalmente exagerada.

El incremento de presión se propaga aguas arriba en forma de onda, a una velocidad “a” que depende de las propiedades elásticas de la tubería, de la compresibilidad del fluido y de la geometría del sistema. La velocidad de la onda permanecerá constante siempre que estas condiciones permanezcan constantes. Viajando a una velocidad “a”, la onda alcanzará el tanque en un tiempo  $L / a$ . En ese momento la velocidad del fluido en cualquier punto de la tubería es cero, la altura de presión en cualquier punto es  $H + \Delta H$ , el tubo está ensanchado y el fluido está comprimido.

Bajo estas condiciones, el líquido en la tubería no está en condición de equilibrio debido a que la altura de presión en el tanque es sólo  $H$ . Consecuentemente, el fluido comienza a moverse hacia el estanque a medida que el tubo distendido desaloja líquido en esa dirección. La velocidad de retorno es de igual magnitud que la velocidad inicial en estado estable ( ya que no se consideró la fricción) y la fuente de líquido para el flujo de retorno es el líquido previamente almacenado en el interior de la tubería ensanchada (líquido comprimido).

Este proceso continúa y cuando el tiempo es igual  $2L / a$ , la presión a través de toda la tubería ha regresado a su valor normal (pero aún sigue saliendo fluido). Sin embargo, no hay una fuente de líquido en la válvula que alimente el flujo aguas arriba, por lo que la

altura de presión decae hasta  $H - \Delta H$  para forzar a que la velocidad de retorno se haga cero. Esta caída de presión hace que la tubería se contraiga y el fluido se expanda.

En el tiempo  $3L / a$  este efecto ha llegado hasta el tanque y la velocidad del flujo es cero en cualquier sección de la tubería. Sin embargo, la altura de presión en el tubo es un  $\Delta H$  menor que la del tanque. Por lo tanto, el tubo succiona líquido del tanque creando un flujo que tiene una velocidad igual, en magnitud y dirección, al flujo estable original. Mientras esto ocurre, la presión dentro del tubo también está retornando a su valor original.

En el tiempo  $4L / a$  la onda ya ha alcanzado la válvula, y en ese instante el flujo es idéntico al flujo original de estado estable. Este tiempo transcurrido constituye el período de la onda. A medida que el tiempo prosigue, este ciclo de eventos continuará sin cesar (en ausencia de fricción).

Algunos conceptos fundamentales se pueden obtener examinando más detalladamente lo que ocurre en este sistema. Por ejemplo, es claro que el parámetro que describe mejor la secuencia de eventos de un modo significativo, no es el tiempo en sí, sino la relación  $L / a$ . Es muy ilustrativo graficar la altura de presión versus tiempo, en diversos puntos de la tubería como se muestra en la figura 7. Nótese que la altura de presión en la válvula fluctúa entre  $(H + \Delta H)$  y  $(H - \Delta H)$ . La altura de presión en los otros puntos también experimenta fluctuaciones periódicas.

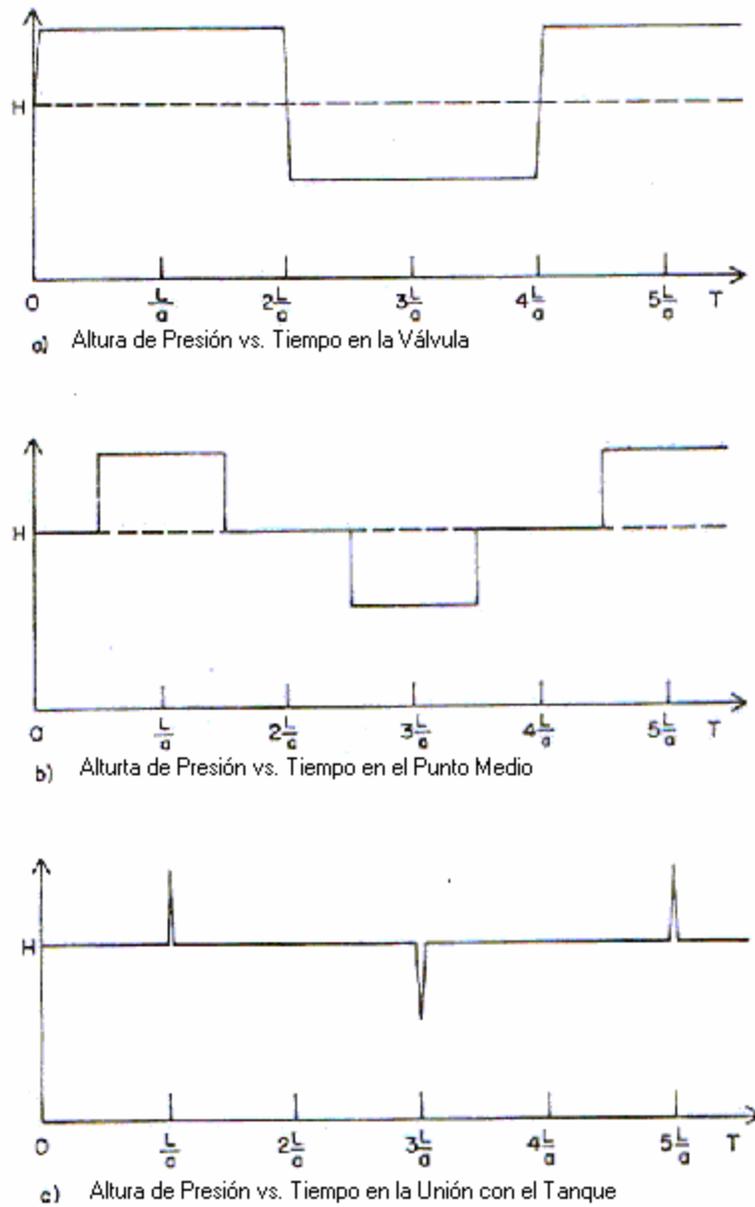


FIGURA 7. Altura de Presión vs. Tiempo en Tres Ubicaciones a lo Largo de la Tubería.

(tomado de la referencia bibliográfica 86)

Nótese de la Figura 7 (b) que la presión no se incrementa en el punto medio (el punto aún “no se ha enterado de lo sucedido en la válvula”) hasta que ha transcurrido el

tiempo suficiente para que la onda viaje desde la válvula hasta el punto. Una vez que la altura de presión se ha incrementado, esta permanece así por un tiempo hasta que la onda regrese al punto procedente del tanque y se restablezca temporalmente la altura de presión  $H$ . Esta idea del “tiempo de comunicación” o “tiempo de propagación del mensaje” es fundamental para una buena comprensión de lo que sucede en un sistema sometido a golpe de ariete.

Otro punto importante se puede observar en figura 7 (a). Suponga que en vez de cerrar la válvula súbitamente, esta se va cerrando en 10 pasos, cada uno incrementa la altura de presión en la válvula en  $\Delta H / 10$ . Asuma también que el cierre completo de la válvula se alcanza antes de que transcurran los  $2L / a$  segundos (antes que retornen las primeras ondas). Es claro que se alcanzará en la válvula la máxima sobrepresión  $\Delta H$ , debido que las primeras ondas que partieron de ella, aún no han retornado para invertir su signo. El punto a destacar es que una válvula no necesita ser cerrada súbitamente para crear la máxima presión de golpe de ariete. Realmente, cualquier tiempo de cierre menor que el tiempo necesario para que la onda regrese del tanque (un tubo mas grande puede actuar también como un tanque), causará presiones máximas de golpe de ariete. Lógicamente, en este caso se alcanza tal sobrepresión máxima por la suma de una serie de ondas que son la consecuencia de los distintos cierres progresivos de la válvula hasta el cierre total. A un cierre como este, que no es instantáneo pero que tampoco impide que se alcance la sobrepresión  $\Delta H$ , se le llama cierre rápido.

En cambio, si el tiempo de cierre es superior a  $2L / a$ , aún no se habrá cerrado por completo la válvula cuando las primeras ondas procedentes del depósito, estén ya de vuelta.

Entonces es necesario cerrar cualquier válvula en un tiempo mayor que  $2L / a$  para impedir que las altas presiones ocurran.

## 2.9 TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN SISTEMAS COMPLEJOS

En la mayoría de los sistemas hidráulicos existen grupos de bombeo, depósitos, válvulas, etc., conectados a una red ramificada o mallada de tuberías que lo hacen un tanto más complejo. Un sistema hidráulico complejo es aquel constituido por cierto número de tuberías, dispuestas según cualquier topología, y que puede contener condiciones de contorno específicas (depósitos, válvulas, bombas, acumuladores, etc.).

El flujo transitorio subsecuente a una perturbación originada en cualquier punto del sistema, depende del modo como ésta se propaga a través del medio tubería-fluido (bajo la forma de ondas elásticas de presión y ondas de flujo), sufriendo atenuaciones y eventuales ampliaciones, como consecuencia de los efectos de la disipación de energía. Pero también depende de la forma en que se propaga al resto de las tuberías del sistema, siendo parcialmente transmitida y reflejada en todas las discontinuidades del sistema. Estas discontinuidades se refieren a cualquier alteración en las características de la tubería (por ejemplo, el diámetro, espesor o la celeridad) o bien a cualquier dispositivo intercalado en el mismo (por ejemplo, depósitos, válvulas, bombas, cambios de diámetros, bifurcaciones, etc.). Es un hecho que las perturbaciones transitorias son intrínsecamente menos severas en

el caso de sistemas más complejos, debido a las sucesivas reflexiones y transmisiones de las ondas. En particular en las redes malladas que consisten de longitudes de tubos relativamente cortas ( menos de 500 metros), son de por sí más seguras que los sistemas más largos de una sola tubería.

## 2.10 LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

En la Figura 8 se muestra una sección de tubo en la cual viaja una onda en dirección aguas arriba. La masa de fluido que entra a la longitud elemental  $\delta x$  en el tiempo  $\delta t$  es  $\rho A V \delta t$ , y la masa que sale de esta en ese mismo tiempo es:

$$\left( r + \frac{\partial r}{\partial x} dx \right) \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} dx \right) \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \right) dt$$

La masa adicional que puede ser alojada dentro del espacio delimitado por  $\delta x$ , debido a la compresibilidad del fluido y a la elasticidad de la tubería durante el intervalo de tiempo  $\delta t$ , se debe al incremento de la presión media en ese intervalo de tiempo y se puede definir como:

$$r \cdot A \cdot dx \frac{\partial P}{\partial t} dt \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{TE} \right)$$

La entrada neta de masa al volumen de control delimitado por  $\delta x$  debe ser igual a la cantidad de masa que la compresión del fluido y la distensión de la tubería puedan permitir, esto es:

$$rAVdt - \frac{\partial r}{\partial x} dxAVdt - rV \frac{\partial A}{\partial x} dxdt - rA \frac{\partial V}{\partial x} dxdt - rAVdt = r.A.dx \frac{\partial P}{\partial t} dt \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{TE} \right) \quad (21)$$

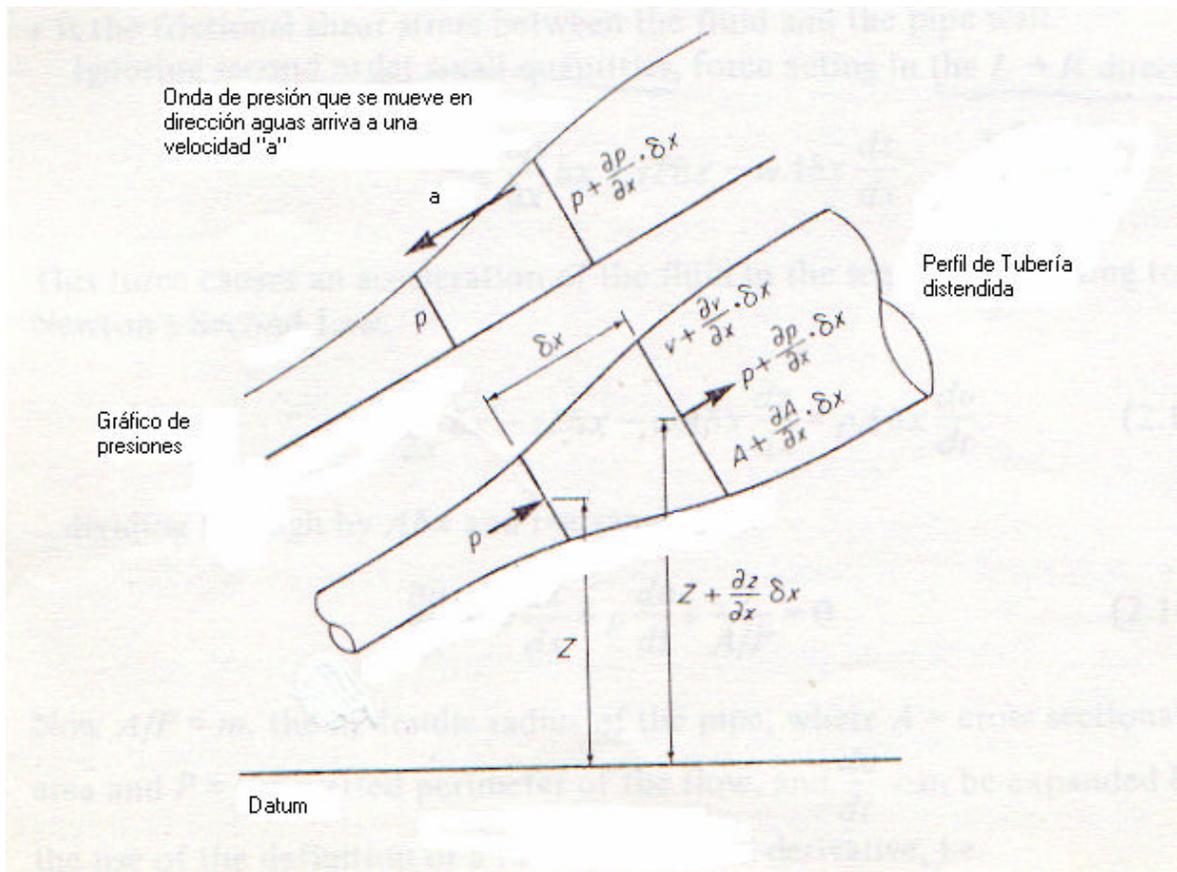


FIGURA 8. Esquema para la deducción de las ecuaciones gobernantes del flujo transitorio unidimensional en tuberías (tomado de la referencia bibliográfica 18)

Sacando factor común  $dxdt$  del lado izquierdo y luego cancelándolo, queda:

$$AV \frac{\partial r}{\partial x} + rV \frac{\partial A}{\partial x} + rA \frac{\partial V}{\partial x} + rA \frac{\partial P}{\partial t} \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{TE} \right) = 0 \quad (22)$$

pero  $\frac{g}{g \cdot a^2} = \frac{1}{K} + \frac{D}{TE}$ , (J. A., Fox; pag. 19) y sabiendo además que  $P = (H - z)g$

Se pueden sustituir estas expresiones en la ec. 22 y luego dividirla entre  $A$ , resultando:

$$\frac{V}{r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

Si se considera que  $r = r_o \left( 1 + \frac{P}{K} \right)$ , entonces  $\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{r_o}{K} \frac{\partial P}{\partial x}$

Si además  $A = A(P, x)$ , entonces  $\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial x}$

Considérese también que en el caso de una sección transversal circular,  $A = \frac{\pi}{4} D^2$

Entonces:

$$\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{V}{\frac{\rho}{4} D^2} \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{\rho}{4} D^2 \right) \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{V}{\frac{\rho}{4} D^2} \frac{\rho}{4} 2D \frac{\partial D}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{2V}{D} \frac{\partial D}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial x}$$

Pero,  $\frac{\partial D}{\partial P} = \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{f_h}{E} D \right) = \frac{\partial}{\partial P} \left( \frac{PD}{2TE} D \right) = \frac{D^2}{2TE}$ , por lo tanto:

$$\frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 2 \frac{V}{D} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{D^2}{2TE} = V \frac{\partial P}{\partial x} \frac{D}{TE}$$

Si  $g(H - z) = P$ , entonces  $g \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial t}$ ; por lo tanto la ec. 23 se convierte en

$$\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\rho_o}{\rho} \frac{\partial x}{K} + \frac{VD}{TE} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

donde  $\rho_o$  es la densidad a la presión original sobre la cual la presión es medida.

Si  $\frac{\rho}{\rho_o} = 1 + \frac{P}{K}$ , donde K es muy grande comparado con cualquier valor práctico

de P, entonces  $\rho/\rho_o$  puede ser razonablemente aproximado a la unidad. Por lo tanto la ec.

24 queda:

$$\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + Vg \left( \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{TE} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

pero  $g \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{TE} \right) = \frac{g}{a^2}$ . Sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior, finalmente

queda:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

Esta es la ecuación de continuidad en forma diferencial para flujo transitorio unidimensional en tuberías.

## 2.11 ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Se puede escribir una ecuación de balance de fuerzas para la sección de tubo mostrada en la Figura 8. Tomando las fuerzas que actúan de derecha a izquierda como positivas, los términos de dicha ecuación son:

$PA$  : Fuerza normal de presión que actúa en el lado izquierdo del segmento de tubo.

$-\left( P + \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} dx \right)$  : Fuerza normal de presión que actúa en el lado derecho del segmento de tubo.

$\left( P + \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} dx \right) \left( \frac{\partial A}{\partial x} dx \right)$  : Es la componente longitudinal de la reacción de la fuerza de presión media, desde la pared del tubo hacia el fluido.

$-tP_m dx$  : Es la fuerza de fricción que se opone al flujo.

$-gA dx \frac{dz}{dx}$  : Es la componente del peso que actúa en dirección axial y opuesta al flujo.

NOTA:  $P_m$  es el perímetro mojado medio del segmento de tubo y  $\tau$  es el esfuerzo de corte debido a la fricción entre el fluido y la pared del tubo.

Después de distribuir, simplificar términos y no considerar los términos de segundo orden, la suma de estas fuerzas nos da:

$$-A \frac{\partial P}{\partial x} dx - tP_m dx - gA dx \frac{dz}{dx}$$

De acuerdo a la Segunda Ley de Newton, esta fuerza causa una aceleración del fluido que está dentro del segmento de tubo,

$$-A \frac{\partial P}{\partial x} dx - tP_m dx - gA dx \frac{dz}{dx} = rA dx \frac{dV}{dt} \quad (26)$$

Dividiendo por  $A\delta x$  y arreglando queda:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \mathbf{g} \frac{dz}{dx} + \mathbf{r} \frac{dV}{dt} + \frac{\mathbf{t}}{A/P_m} = 0 \quad (27)$$

Donde  $A / P_m = m$ , radio hidráulico del tubo. Luego,  $\frac{dV}{dt}$  puede ser expandida usando la definición de derivada total, esta es:

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Además,  $\frac{dz}{dx} = \frac{\partial z}{\partial x}$ . Sustituyendo estas últimas tres expresiones en ec. 27 resulta:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \mathbf{g} \frac{\partial z}{\partial x} + \mathbf{r} \left( V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{\mathbf{t}}{m} = 0$$

reacomodando términos queda:

$$\frac{\partial}{\partial x} (P + \mathbf{g}.z) + \mathbf{r}V \frac{\partial V}{\partial x} + \mathbf{r} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\mathbf{t}}{m} = 0$$

Dividiendo entre  $\gamma (= \rho g)$ , resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} + z \right) + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{t}{\rho g m} = 0$$

Si introducimos en la ecuación anterior el factor de fricción  $f$ , definido por:

$$f = \frac{t}{\frac{1}{8} \rho V |V|}$$

que dividiendo entre  $(\rho g m)$  y reorganizando queda:

$$\frac{V |V| f}{8 g m} = \frac{t}{\rho g m}$$

(Esto implica el uso de una fórmula de fricción en estado estable).

Y sabiendo que la cantidad entre paréntesis se define como la altura piezométrica  $H$ , entonces la ecuación diferencial anterior se transforma en

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{8 g m} = 0 \quad (28 a)$$

que para conducción de sección recta circular sería

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2gD} = 0 \quad (28 \text{ b})$$

ya que “m” fue sustituido por  $D / 4$ .

Las ecuaciones 25 y 28 b, continuidad y cantidad de movimiento, son un par de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasi lineales, y como tales, no pueden ser resueltas analíticamente. Las dos representan el problema de la propagación de la onda considerando fluido compresible y tubería elástica. Algunos autores como Allievi han hecho algunas simplificaciones a este sistema de ecuaciones, con el fin de obtener una solución analítica. Esto está suficientemente documentado en la pag. 30 del libro de J.A., Fox.

## 2.12 EL MODELO ANALÍTICO TRANSITORIO

El modelo analítico transitorio está constituido por las siguientes ecuaciones gobernantes: la Ecuación de Conservación de la Masa y la Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento, para flujo unidimensional no permanente en tuberías.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad (30)$$

Donde :

$g$  : es la aceleración de gravedad

$H$  : es la altura piezométrica ( $p/\gamma + z$ )

$x$  : es la coordenada longitudinal

$V$  : es la velocidad media en la sección transversal

$t$  : es el tiempo

$f$  : es el factor de fricción de Darcy

$D$  : es el diámetro de la tubería

$a$  : es la velocidad de propagación de las perturbaciones en las magnitudes del flujo.

$\frac{\partial z}{\partial x}$  : es el  $\sin\theta$

$\theta$  : ángulo de inclinación de la tubería

Este es un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasi-lineales de primer orden. De las diferentes técnicas numéricas que existen para resolver estas ecuaciones, se seleccionó el método de las características por las siguientes razones:

1. Permite seguir la naturaleza física verdadera del flujo transitorio a presión. Es decir, las ondas numéricas se propagan a lo largo de las tuberías llevando los cambios de presión o de velocidad, tal como lo hacen las ondas elásticas.
2. El código fuente no es difícil de escribir e implementar

### 2.13 EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

El método supone que el par de ecuaciones diferenciales parciales anteriores puede ser reemplazado por una combinación lineal de ellas mismas. Se puede multiplicar la ec. 30 por un factor  $\lambda$  y luego agregarle la ec. 29, como se describe a continuación:

$$\lambda \left[ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2gD} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{dz}{dx} \right] = 0 \quad (31)$$

la cual se puede describir como sigue:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + (1+V) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \left[ \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \left( \frac{1V}{g} + \frac{a^2}{g} \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + f \frac{V|V|}{2gD} - V \frac{dz}{dx} = 0 \quad (32)$$

En la cual los términos entre corchetes pueden ser reemplazados por sus equivalentes, si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + (I + V) \frac{\partial H}{\partial x} \right] = \frac{dH}{dt}, \text{ solo si } \frac{dx}{dt} = I + V \quad (33)$$

$$\left[ \frac{I}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \left( \frac{IV}{g} + \frac{a^2}{g} \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] = \frac{I}{g} \frac{dV}{dt}, \text{ solo si } \frac{I}{g} \frac{dx}{dt} = \frac{IV}{g} + \frac{a^2}{g} \quad (34)$$

Despejando  $\frac{dx}{dt}$  de las ecuaciones condicionantes 33 y 34, e igualando, se obtiene que  $I = \pm a$ .

Para  $I = a$  las ecuaciones condicionantes dan  $\frac{dx}{dt} = V + a$  y la ec. 32 se transforma en:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - V \frac{dz}{dx} + \frac{a}{g} f \frac{V \cdot |V|}{2D} = 0 \quad \text{solo si } \frac{dx}{dt} = V + a \quad (35)$$

Para  $I = -a$  las ecuaciones condicionantes dan  $\frac{dx}{dt} = V - a$  y la ec. 32 se transforma en:

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - V \frac{dz}{dx} - \frac{a}{g} f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = V - a \quad (36)$$

Si se multiplica la ec. 35 por  $\left(\frac{g}{a}\right)$  y la ec. 36 por  $\left(-\frac{g}{a}\right)$ , se puede describirlas a ambas:

$$C^+: \quad \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} V \frac{dz}{dx} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = V + a \quad (37)$$

$$C^-: \quad \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} V \frac{dz}{dx} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = V - a \quad (38)$$

## 2.14 LA SOLUCIÓN NUMÉRICA

En este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no se puede hablar de rectas características en el plano  $x - t$ , sino de curvas características cuyas pendientes son una función de  $V(x,t)$ . Sin embargo, el método de las características supone que, en cada intervalo de tiempo  $\Delta t$ , se puede aproximar cada curva característica a una línea recta, cuya pendiente se determina con el valor conocido de la velocidad en el tiempo previo, como se puede observar en la malla rectangular  $\Delta x - \Delta t$  de la Figura 9. Las características se interceptan en "P" pero no pasan por los puntos de malla "Le" y "Ri", sino a través de los puntos "L" y "R", que pertenecen a una línea de tiempo constante.

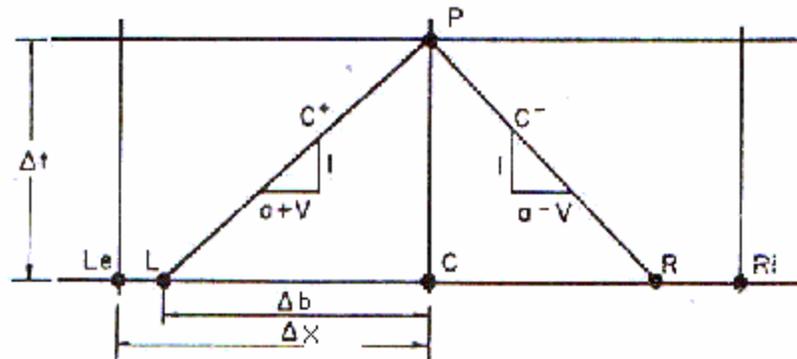
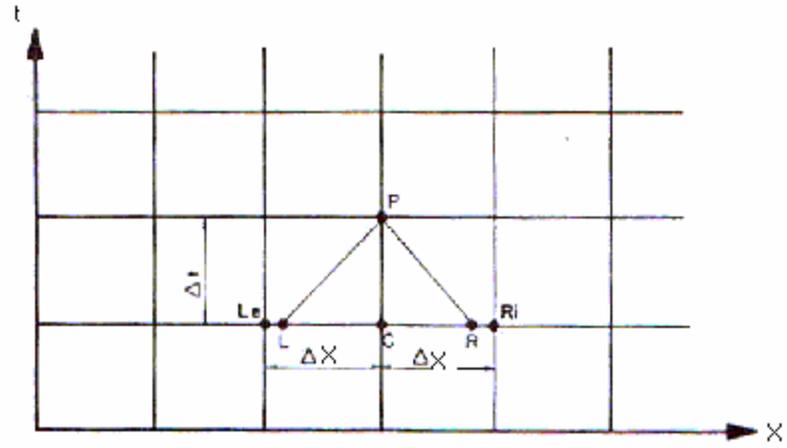


FIGURA 9. Interpolación de H y V en una malla  $\Delta x - \Delta t$

Bajo estas premisas, la aproximación en diferencias finitas a las ecuaciones diferenciales anteriores, es:

$$C^+: \quad \frac{V_P - V_L}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{H_P - H_L}{\Delta t} - \frac{g}{a} V_L \frac{dz}{dx} + f \frac{V_L |V_L|}{2D} = 0 \quad (39)$$

$$C^-: \quad \frac{V_P - V_R}{\Delta t} - \frac{g}{a} \frac{H_P - H_R}{\Delta t} + \frac{g}{a} V_R \frac{dz}{dx} + f \frac{V_R |V_R|}{2D} = 0 \quad (40)$$

Donde las incógnitas son  $V_P$  y  $H_P$ . Los valores de  $V_L$ ,  $H_L$ ,  $V_R$  y  $H_R$ , se pueden obtener por interpolación lineal a partir de los valores conocidos  $V_{LE}$ ,  $H_{LE}$ ,  $V_{RI}$ ,  $H_{RI}$ ,  $V_C$  y  $H_C$ . A continuación, a manera de ejemplo, se ilustra como determinar  $V_L$  y  $H_L$ :

Considerando la recta característica  $C^+$ ,

$$\frac{\Delta b}{\Delta x} = \frac{V_L - V_C}{V_{LE} - V_C} = \frac{H_L - H_C}{H_{LE} - H_C}$$

Donde,

$$\frac{\Delta b}{\Delta t} = \frac{a + V_L}{1}$$

Despejando  $V_L$  y  $H_L$  queda

$$V_L = (V_{LE} - V_C) \frac{\Delta b}{\Delta x} + V_C$$

y

$$H_L = (H_{LE} - H_C) \frac{\Delta b}{\Delta x} + H_C$$

Sustituyendo el valor de  $\Delta b = (a + V_L)\Delta t$  en las dos últimas ecuaciones, da

$$V_L = \frac{V_C + a \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_{LE} - V_C)}{1 - \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_{LE} - V_C)} \quad (41)$$

y

$$H_L = H_C + \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{LE} - H_C)(a + V_L) \quad (42)$$

El mismo análisis para la característica  $C^-$  conduce a

$$V_R = \frac{V_C + a \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_{RI} - V_C)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_{RI} - V_C)} \quad (43)$$

y

$$H_R = H_C + \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_{RI} - H_C)(a - V_R) \quad (44)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones 39 y 40 para  $V_P$  y  $H_P$ , finalmente queda

$$V_P = \frac{1}{2} \left[ (V_L + V_R) + \frac{g}{a} (H_L - H_R) + \frac{g}{a} \Delta t (V_L - V_R) \text{sen } \mathbf{q} - \frac{f \Delta t}{2D} (V_L |V_L| + V_R |V_R|) \right] \quad (45)$$

$$H_P = \frac{1}{2} \left[ (H_L + H_R) + \frac{a}{g} (V_L - V_R) + \Delta t (V_L + V_R) \text{sen } \mathbf{q} - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} (V_L |V_L| - V_R |V_R|) \right] \quad (46)$$

donde  $V_L$ ,  $H_L$ ,  $V_R$  y  $H_R$  se pueden conocer mediante las ecuaciones 41, 42, 43 y 44.

Además,  $\text{sen } \theta = dz/dx$  (positivo para tubos que suben en dirección aguas abajo).

## 2.15 SELECCIÓN DEL INTERVALO DE TIEMPO

Debido a que en el presente trabajo se ha seleccionado una malla rectangular uniforme en espacio y tiempo por su simplicidad de programación, se puede integrar las

ecuaciones características  $C^+$  y  $C^-$ , manteniendo  $V$  constante (bajo el supuesto de pendiente constante), resultando las siguientes dos ecuaciones:

$$\Delta x = \Delta t |V + a|$$

$$\Delta x = \Delta t |V - a|$$

donde el valor de  $\Delta x$  se determina por el número de tramos en los cuales se va a dividir el único tubo (longitud entre el número de tramos) . Debido a que el procedimiento de interpolación usado implica que los puntos  $R$  y  $L$  están entre los puntos  $R_i$  y  $L_e$ , se debe seleccionar un  $\Delta t$  tan pequeño para garantizar que esto siempre sea así. Las ecuaciones precedentes sugieren que:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\max |a + V|}$$

donde  $\max |a+V|$ , es el máximo valor absoluto esperado de la suma de la velocidad de la onda y la velocidad del fluido en el tubo. Si los puntos  $R$  y  $L$  caen fuera de los puntos de malla  $R_i$  y  $L_e$  , comenzarán a desarrollarse problemas de estabilidad numérica y de precisión, lo cual se debe evitar.

En el caso de sistemas de múltiples tubos donde cada tubo tiene propiedades físicas y geométricas diferentes, esta última fórmula puede conducir a  $\Delta t$  diferentes para cada tubo

de acuerdo al número de tramos en que esté dividido. Para los efectos del cálculo numérico es muy conveniente contar con un  $\Delta t$  uniforme en todos los tubos de la red. Esto se hace fijando un número de tramos  $N$  en el que el tubo más corto es dividido, luego se calculan los  $\Delta t$ 's de todos los tubos usando este  $N$  y se selecciona el  $\Delta t$  mínimo. Luego, con este  $\Delta t_{\min}$  se calculan los  $N_i$  de los restantes tubos mediante:

$$N_i = \frac{L_i}{\Delta t_{\min} (V_i + a_i)}$$

Debido a  $N_i$  puede dar un número decimal es necesario redondear al entero inmediatamente inferior para obtener el número apropiado de tramos  $N_i$  en el quedará dividido el  $i$ -ésimo tubo. Con esto se logra que todos los tubos tengan un  $\Delta t$  uniforme e igual a  $\Delta t_{\min}$ .

## 2.16 TRATAMIENTO DE LA FRICCIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Como modelar la resistencia hidráulica transitoria y la pérdida de carga asociada, es aún un problema sin resolver. En la literatura se han propuestos algunos modelos para estimar el factor de fricción “ $f$ ” en flujo transitorio en tuberías (Modelo de Zielke, Modelo de Brunone y otros), pero a pesar de que se ha avanzado significativamente en flujo transitorio laminar, aún no se han obtenidos resultados concluyentes para flujo turbulento.

La práctica mas común es aceptar la llamada hipótesis cuasi-estable (que se usará en el presente trabajo), según la cual el factor de fricción “ $f$ ” depende de la velocidad media instantánea del flujo en cada tubería. Es decir, que para cada instante de tiempo, hay que actualizar el número de Reynolds y recalcular el factor de fricción en cada tubería, usando la misma ecuación que para flujo estable.

También, las pérdidas de carga en los accesorios de tubería se calcularán como en el régimen estable, esto es, asumiendo que son directamente proporcionales a la altura de velocidad instantánea.

## 2.17 CONDICIONES DE BORDE

Es posible obtener una solución para la altura piezométrica  $H$  y la velocidad  $V$  en los extremos de cada tubería, si se conoce el comportamiento de estos extremos. Dicho comportamiento viene expresado generalmente en términos de relaciones especiales que definen la velocidad o la altura piezométrica, o una relación entre ambos, y que, conjuntamente con una ecuación característica ( $C^+$  o  $C^-$ ), permiten obtener una solución para  $H$  y  $V$  en cada extremo, a cada instante de tiempo. Estas relaciones se conocen con el nombre de condiciones de borde. Algunas de ellas son usadas en el presente trabajo y se describen a continuación.

## 2.18 UNIÓN DE TRES TUBERÍAS.

El modelo de unión de tres tuberías se muestra en la figura 10, donde los sentidos de flujo están indicados por flechas cuyas direcciones son dictadas por las condiciones estables. Los signos de los términos en las ecuaciones que describen el comportamiento del nodo se determinarán por la configuración del flujo en estado estable.

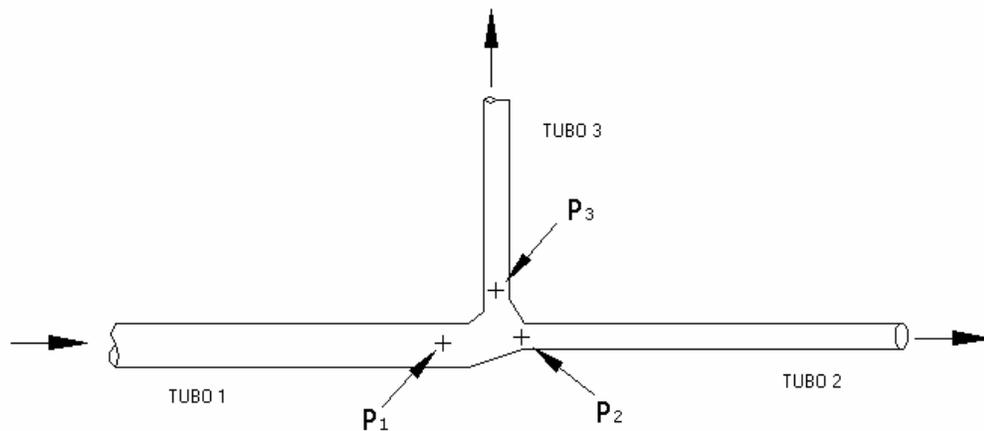


Figura 10. Unión de Tres Tuberías (una entrando y dos saliendo).

Para el nodo con una tubería de entrada y dos tuberías de salida, las ecuaciones siguientes pueden escribirse para resolver las seis incógnitas:

$$\text{Tubería 1—C}^+ \quad V_{P_1} = C_1 - C_2 H_{P_1} \quad (47)$$

$$\text{Tubería 2—C}^- \quad V_{P_2} = C_3 + C_4 H_{P_2} \quad (48)$$

$$\text{Tubería 3—C}^- \quad V_{P_3} = C_5 + C_6 H_{P_3} \quad (49)$$

$$\text{Continuidad} \quad V_{P_1} A_1 = V_{P_2} A_2 + V_{P_3} A_3 \quad (50)$$

$$\text{Energía} \quad H_{P_1} = H_{P_2} = H_{P_3} \quad (51)$$

donde el subíndice numérico indica que la velocidad  $V$  y la altura piezométrica  $H$  se refiere a un tubo particular en la unión. Note que la última ecuación realmente son dos ecuaciones independientes.

Resolviendo este sistema de ecuaciones lineales, resulta:

$$H_{p1} = H_{p2} = H_{p3} = \frac{C_1 A_1 - C_3 A_2 - C_5 A_3}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3} \quad (52)$$

Substituyendo este resultado en las ecuaciones anteriores ( 47 ), ( 48 ), y ( 49 ) se obtendrán los valores de las velocidades.

Si en cambio se tiene una unión de tres tuberías, con dos tuberías de entrada y una de salida como muestra la Figura 11, un análisis similar al anterior, daría las ecuaciones siguientes para las velocidades y valores de H desconocidas.

$$H_{p1} = H_{p2} = H_{p3} = \frac{C_1 A_1 + C_3 A_2 - C_5 A_3}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3} \quad (53)$$

$$V_{p1} = C_1 - C_2 H_{p1} \quad (54)$$

$$V_{p2} = C_3 - C_4 H_{p2} \quad (55)$$

$$V_{p3} = C_5 + C_6 H_{p3} \quad (56)$$

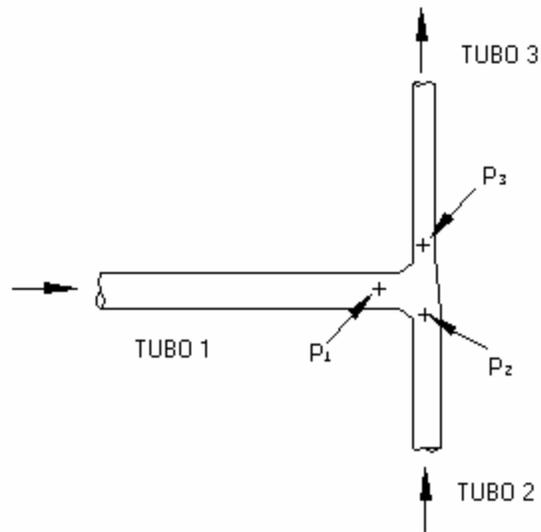


Figura 11. Unión de Tres Tuberías (dos entrando y una saliendo).

La mayoría de las uniones de tres tuberías, caen dentro de los casos anteriores. Sin embargo, es posible, en redes de tuberías, que exista una demanda constante (caudal de salida) en determinado nodo.

Como un ejemplo de unión de tres tuberías con una demanda constante, vea Figura 12, las ecuaciones (47), (48), y (49) aún son válidas, al igual que la ecuación (51). Sin embargo, ecuación (50) debe cambiar a:

$$V_{p1}A_1 = V_{p2}A_2 + V_{p3}A_3 + Q \quad (57)$$

Resolviendo de nuevo el sistema de ecuaciones, resulta:

$$H_{P1} = H_{P2} = H_{P3} = \frac{C_1 A_1 - C_3 A_2 - C_5 A_3 - Q}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3} \quad (58)$$

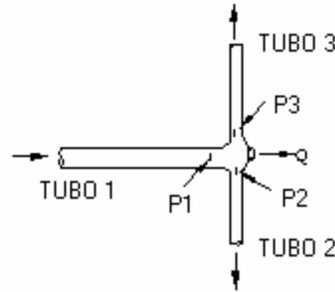


Figura 12. Unión de tres tuberías con demanda de flujo constante.

## 2.19 PÉRDIDAS DE CARGA SIGNIFICATIVAS EN TUBERÍAS EN SERIE

En una tubería, puede existir algún accesorio que causa una pérdida significativa en el sistema, por diseño (una válvula reductora de presión), o por la necesidad (una contracción, un medidor, una válvula parcialmente cerrada, etc.). En cualquier caso, si la pérdida es significativa comparada a otras pérdidas friccionales en el sistema, debe ser incluida en el análisis.

Los posibles enfoques para modelar esta pérdida son: distribuirla uniformemente aumentando la rugosidad de la tubería; acumularla en las condiciones de borde de uno de los extremos de la tubería o tratarla en su misma ubicación física en el tubo. Debido a que esta última opción refleja mejor la situación física, enfocaremos el problema de formular esta condición de borde, con esta configuración en mente.

Se supondrá que la tubería en cada lado del accesorio es de diámetro distinto y que la pérdida a través del mismo es proporcional al cuadrado de la velocidad en la tubería aguas abajo. De acuerdo a la figura 13, las ecuaciones a lo largo de las líneas características son:

$$\text{Tubería 1, } C^+ : \quad V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1} \quad (59)$$

$$\text{Tubería 2, } C^- : \quad V_{P2} = C_3 + C_4 H_{P2} \quad (60)$$

$$\text{Continuidad:} \quad V_{P1} A_1 = V_{P2} A_2 \quad (61)$$

La aplicación de la ecuación de energía para el accesorio, supone que la pérdida sería la misma que para las condiciones de flujo estable pero usando la velocidad instantánea.

$$\text{Energía:} \quad H_{P1} = H_{P2} + K_L \frac{V_{P2}^2}{2g} \quad (62)$$

Combinando estas ecuaciones y sustituyendo las Ecuaciones ( 59 ), ( 60 ), ( 61 ) en ( 62 ), da la ecuación siguiente para  $V_{P2}$ .

$$V_{P2}^2 + \frac{2g}{K_L} \left( \frac{1}{C_4} + \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{C_2} \right) V_{P2} - \frac{2g}{K_L} \left( \frac{C_3}{C_4} + \frac{C_1}{C_2} \right) = 0 \quad (63)$$

Para resolver la ecuación cuadrática tomamos

$$B = \frac{2g}{K_L} \left( \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_4} \right)$$

$$C = \frac{2g}{K_L} \left( \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_3}{C_4} \right)$$

para que la ecuación ( 63 ) se vuelva

$$V_{p2}^2 + BV_{p2} - C = 0$$

Resolviendo,

$$V_{p2} = \frac{1}{2} \left[ -B \pm \sqrt{B^2 + 4C} \right]$$

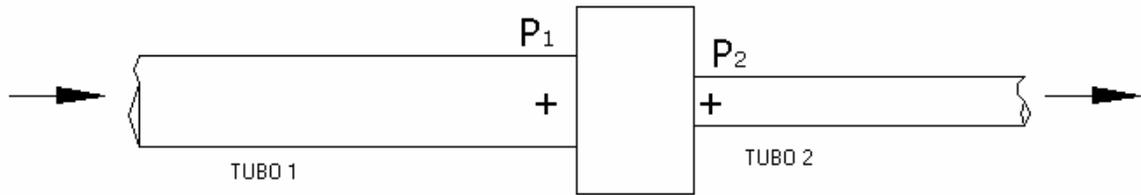


Figura 13. Modelo para las Pérdidas Significativas en Tubería en Serie

Debido a que  $C_2$  y  $C_4$  siempre son positivos,  $B$  siempre es positivo. Por consiguiente, el símbolo (+) se deja delante de la raíz. La ecuación final es

$$V_{p2} = \frac{B}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{4C}{B^2}} \right] \quad (64)$$

La otra velocidad y los valores de  $H$  pueden ser encontrados por substitución en las ecuaciones ( 59 ), ( 60), y ( 61).

Un problema adicional se crea por este tipo de pérdida. Si  $V_{p2}$  da negativa, hay flujo en reversa y la ecuación de energía ( 62 ) ya no es válida. Para contraflujo la ecuación de energía es: :

$$H_{P1} + K_{Lrev} \frac{V_{P1}^2}{2g} = H_{P2}$$

Las constantes  $B$  y  $C$  deben ser recalculadas y una ecuación alterna se obtendrá para  $V_{P2}$ .

## 2.20 DINÁMICA DE LAS VÁLVULAS

En todas las situaciones de flujo transitorio enfrentadas por la ingeniería, el modelaje del movimiento de la válvula requiere un tratamiento especial. En virtud de la contracción del flujo, la válvula que cierra, crea pérdidas de carga crecientes en el sistema de tuberías que causa la desaceleración del flujo. Los diferentes tipos de válvulas crean pérdidas de carga de distintas maneras, de acuerdo al procedimiento de cierre, así como al diseño mecánico de la válvula.

En un sentido tradicional, para el flujo hidráulico estable, la pérdida de carga a través de una válvula se caracteriza por la ecuación

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

donde el  $h_L$  es la pérdida de carga,  $V$  es la velocidad en la tubería (no la velocidad a través de la válvula que abre o cierra), y  $K_L$  es el coeficiente de pérdida. En muchos casos, el ingeniero puede tener información que da la pérdida de carga en la válvula a sólo dos o tres aberturas. Es importante que el ingeniero pueda usar la información para sintetizar una variación continua de  $K_L$  respecto la posición de la válvula y hacer un análisis con la confianza de que los resultados serán razonablemente precisos.

Se supondrá, en todos los casos, que la pérdida de carga instantánea través la válvula no es afectada por la inestabilidad del flujo, es decir, sólo dependerá de la posición del obturador de válvula y la curva característica de la misma, determinada por ensayo de laboratorio. Con esta perspectiva, se tiene que si se conoce el movimiento del obturador de válvula como una función de tiempo, y si  $K_L$  es conocido como una función de la posición del obturador de válvula, entonces una ecuación de pérdida de carga hidráulica en la válvula, puede ser determinada y usada como una condición de borde en el método de las características. Vemos cómo este enfoque puede proporcionar una solución al problema del movimiento del elemento obturador de la válvula.

## 2.21 VÁLVULA EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO DE UNA TUBERÍA QUE ENTRA A UN TANQUE.

Este es otro caso bastante común de ubicación de válvulas en tuberías. En este caso la válvula se encuentra en el extremo aguas abajo de una tubería. La figura 14 define la situación física en esta condición de borde. Hay sólo dos incógnitas en la sección  $P_1$ , por lo que se requieren tan sólo dos ecuaciones. Ellas son:

$$C^+ : V_{P_1} = C_3 - C_4 H_{P_1} \quad (65)$$

$$\text{Energía} : H_{P_1} = H_0 + K_L \frac{V_{P_1}^2}{2g} \quad (66)$$

Colocando la solución simultánea de estas dos ecuaciones en la forma cuadrática,

$$V_{P1}^2 + \frac{2g}{K_L C_4} V_{P1} + \frac{2g}{K_L} \left( H_0 - \frac{C_3}{C_4} \right) = 0$$

Definiendo

$$B = \frac{2g}{C_4}$$

$$C = 2g \left( H_0 - \frac{C_3}{C_4} \right)$$

que nos permite escribir la ecuación cuadrática como

$$V_{P1} = \frac{B}{2K_L} \left( -1 + \sqrt{1 - \frac{4CK_L}{B^2}} \right) \quad (67)$$

Se obvio el signo (-), para que  $V_{P1}$  sea positivo en la dirección de flujo indicada en la figura 14. Siempre que  $C \leq 0 \Rightarrow V_{P1} \geq 0$ ; pero si existiese un  $C > 0$  que arroje un  $V_{P1}$  negativo entonces esta solución ya no sería válida, porque contradice el sentido original de  $V_{P1}$ , el cual es positivo.

La nueva solución de  $V_{P1}$  en contraflujo sería:

$$V_{P1} = \frac{B}{2K_{Lrev}} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4CK_{Lrev}}{B^2}} \right) \quad (68)$$

siempre que  $C > 0 \Rightarrow V_{P1} < 0$ ; esta última ecuación es producto de resolver nuevamente el sistema de ecuaciones y descartar el signo positivo (+) que antecede a la raíz.

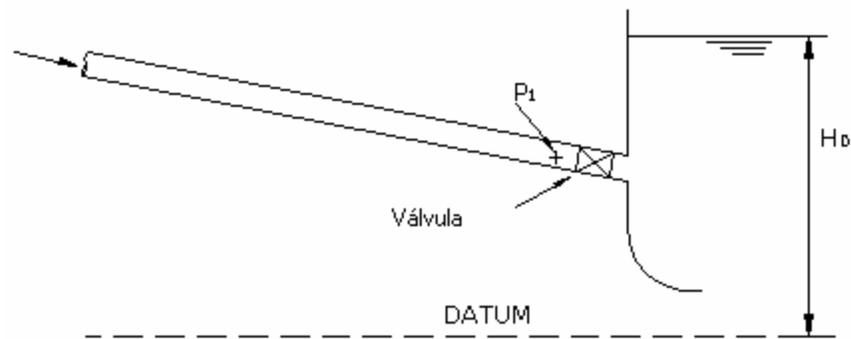


Figura 14. Válvula en el Extremo Aguas Abajo de una Tubería que Entra a Tanque

Queda claro que la incidencia del movimiento del elemento obturador de la válvula, sobre las presiones y velocidades en el sistema, puede conocerse si se puede determinar el

valor instantáneo de  $K_L$ , para una ley de cierre de válvula dada. En la sección “Determinación de  $K_L$ ” se explica como lograr este objetivo.

## 2.22 UNIÓN DE TRES TUBERÍAS, UNA ENTRANTE CON VÁLVULA Y DOS SALIENTES, CON DEMANDA DE CAUDAL CONSTANTE

Este es el caso de una válvula u otro accesorio, ubicado en la cercanía a un nodo. Para minimizar las ecuaciones, se usará como ejemplo la unión de tres tuberías, una entrando con válvula en su última sección, y dos saliendo. El análisis será lo suficientemente claro como para proyectar los resultados, por inspección, a los otros tipos de uniones de tuberías.

El problema a ser resuelto se define por el boceto de la unión en Figura 15. Las ecuaciones para resolver se muestran a continuación:

$$\text{Tubería1}-C^+ : V_{P1} = C_1 - C_2 H_{P1U} \quad (69)$$

$$\text{Tubería2}-C^- : V_{P2} = C_3 + C_4 H_{P2} \quad (70)$$

$$\text{Tubería3}-C^- : V_{P3} = C_5 + C_6 H_{P3} \quad (71)$$

$$\text{Continuidad} : V_{P1} A_1 = V_{P2} A_2 + V_{P3} A_3 + Q \quad (72)$$

$$\text{Energía : } H_{P1D} = H_{P2} = H_{P3} = H_P \quad (73)$$

$$H_{P1U} = H_{P1D} + K_L \frac{V_{P1}^2}{2g} \quad (74)$$

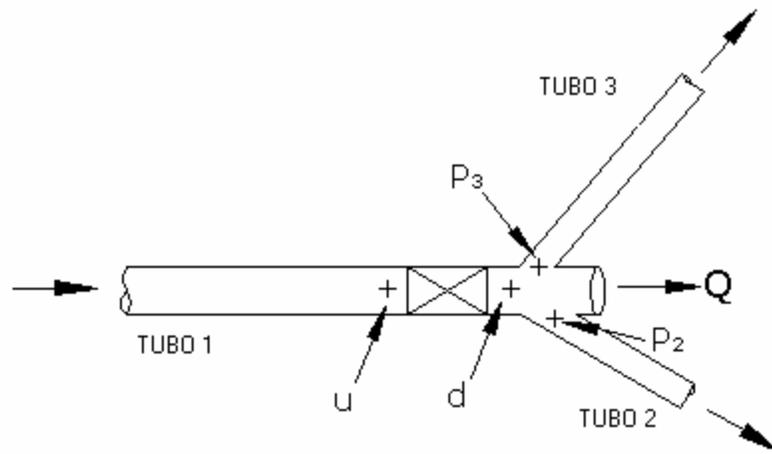


Figura 15. Unión de Tres Tuberías, una Entrante con Válvula y dos Salientes, con Caudal de Demanda Constante.

La complicación aquí es el término no lineal de la pérdida de carga en la válvula, por lo que se propondrá una solución iterativa para  $H_P$ . Para mostrar cómo es esto, se combinan las Ecuaciones (69) y (74). Resolviendo la ecuación de segundo grado resultante, nos resulta que  $V_{P1}$  es:

$$V_{P1} = \frac{g}{K_L C_2} \left[ -1 + \sqrt{1 - \frac{2K_L C_2^2}{g} \left( H_P - \frac{C_1}{C_2} \right)} \right] \quad (75)$$

insertando las ecuaciones (70), (71) y (75), en la ecuación (72), resulta la siguiente ecuación para  $H_P$ .

$$F(H_P) = \frac{gA_1}{K_L C_2} \sqrt{1 - \frac{2K_L C_2^2}{g} \left( H_P - \frac{C_1}{C_2} \right)} - C_4 A_2 H_P - C_6 A_3 H_P - \left( \frac{gA_1}{K_L C_2} + C_3 A_2 + C_5 A_3 + Q \right) = 0 \quad (76)$$

Esta ecuación se resolverá usando el método de Newton-Raphson. Esto se logra probando valores sucesivos de  $H_P$ , hasta que  $F(H_P) = 0$  se satisfaga, dentro de tolerancias aceptables.

$$H_P^{(j)} = H_P^{(j-1)} - \frac{F(H_P^{(j-1)})}{F'(H_P^{(j-1)})} \quad (77)$$

Donde  $F' = (dF/dH_P)$  es obtenida diferenciando la ecuación (76)

$$\frac{dF}{dH_P} = \frac{1}{2} \frac{gA_1}{K_L C_2} \left[ 1 - \frac{2K_L C_2^2}{g} \left( H_P - \frac{C_1}{C_2} \right) \right]^{-1/2} \left( \frac{-2K_L C_2^2}{g} \right) - C_4 A_2 - C_6 A_3 \quad (78)$$

El procedimiento iterativo generalmente se empieza usando el valor de  $H_p$  del tiempo inmediatamente anterior, como la primera estimación. También se deben tomar precauciones para evitar el “looping” en la solución iterativa.

### 2.23 NODO CON 3 TUBOS, 1 ENTRANTE CON VÁLVULA Y 2 SALIENTE

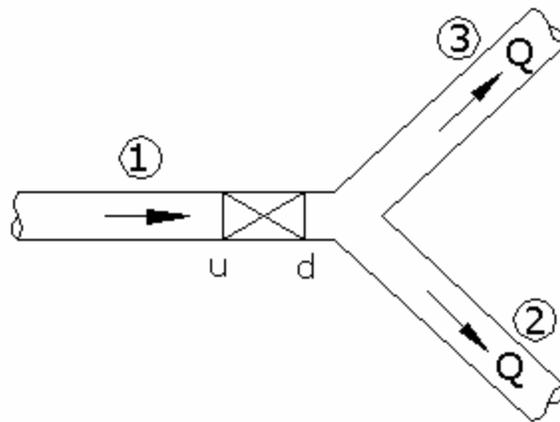


FIGURA 16. Condición de Borde de Nodo con 3 Tubos, 1 entrante con Válvula y 2 Salientes.

Las ecuaciones a resolver en este tipo de nodos son:

$$\text{Tubo 1, } C^+: \quad Vp_1 = C_1 - C_2 Hp_{1u} \quad (79)$$

$$\text{Tubo 2, } C^-: \quad Vp_2 = C_3 + C_4 Hp_2 \quad (80)$$

Tubo 3, C<sup>-</sup>: 
$$Vp_3 = C_5 + C_6 Hp_3 \quad (81)$$

Continuidad: 
$$Vp_1 A_1 = Vp_2 A_2 + Vp_3 A_3 \quad (82)$$

Energía: 
$$Hp_{1U} = Hp_{1D} + K_L \frac{Vp_1^2}{2g} \quad (83)$$

Partiendo de la premisa que la energía Hp en el nodo es común para todos los tubos, se tiene que:

$$Hp = Hp_{1D} = Hp_2 = Hp_3$$

Entonces resulta un sistema de 5 ecuaciones lineales con 5 incógnitas:  $Vp_1$ ,  $Vp_2$ ,  $Vp_3$ ,  $Hp_{1U}$ , y Hp.

Sustituyendo ec. 83 en ec. 79:

$$Vp = C_1 + C_2 \left( Hp + K_L \frac{Vp_1^2}{2g} \right) = C_1 - C_2 Hp - C_2 K_L \frac{Vp_1^2}{2g}$$

reorganizando, queda:

$$\frac{C_2 K_L}{2g} Vp_1^2 + Vp_1 + (C_2 Hp - C_1) = 0$$

Esto es una ecuación de segundo grado donde:

$$a = \frac{C_2 K_L}{2g}$$

$$b = 1$$

$$c = C_2 H p - C_1$$

y cuya solución es:

$$V_{p1} = \frac{g}{K_L C_2} \left[ -1 \pm \sqrt{1 - \frac{2C_2^2 K_L}{g} \left( H p - \frac{C_1}{C_2} \right)} \right] \quad (84)$$

y donde se ha optado por seleccionar el signo positivo que antecede a la raíz para ser compatible con el sentido de  $V_{p1}$  en el tubo 1.

Sustituyendo las ecs. 80, 81 y 84 en la ec. 82, resulta:

$$\frac{g}{C_2 K_L} \left[ -1 + \sqrt{1 - \frac{2C_2^2 K_L}{g} \left( H p - \frac{C_1}{C_2} \right)} \right] A_1 = (C_3 + C_4 H p) A_2 + (C_5 + C_6 H p) A_3$$

$$-\frac{g A_1}{C_2 K_L} + \frac{g A_1}{C_2 K_L} \sqrt{1 - \frac{2C_2^2 K_L}{g} \left( H p - \frac{C_1}{C_2} \right)} = C_3 A_2 + C_4 A_2 H p + C_5 A_3 + C_6 A_3 H p$$

$$\frac{g A_1}{C_2 K_L} \sqrt{1 - \frac{2C_2^2 K_L}{g} \left( H p - \frac{C_1}{C_2} \right)} - (C_4 A_2 + C_6 A_3) H p - \left( \frac{g A_1}{C_2 K_L} + C_3 A_2 + C_5 A_3 \right) = 0$$

La ecuación anterior es del tipo  $F(Hp) = 0$ , se puede encontrar la primera derivada  $F'(Hp)$

$$F'(Hp) = \frac{1}{2} \frac{gA_1}{C_2 K_L} \left[ 1 - \frac{2C_2^2 K_L}{g} \left( Hp - \frac{C_1}{C_2} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \left( -\frac{2C_2^2 K_L}{g} \right) - (C_4 A_2 + C_6 A_3)$$

Con las dos ecuaciones anteriores se puede usar la conocida ecuación de Newton-Raphson, para hallar una solución para  $Hp$ :

$$Hp_{n+1} = Hp_n - \frac{F(Hp_n)}{F'(Hp_n)}$$

De la ecuación 84 se puede determinar  $Vp_1$ . Luego, de las mismas ecuaciones del sistema se pueden conocer las restantes incógnitas  $Hp_{1U}$ ,  $Vp_2$  y  $Vp_3$ . Si  $Vp_1$  resultara negativo, esto indicaría que el sentido de esta, es contrario al asumido, por lo que la anterior solución ya no es válida. Entonces es necesario invertir el flujo en el tubo 1, replantear el sistema de ecuaciones y resolverlo nuevamente.

## 2.24 NODO CON 3 TUBOS, 2 ENTRANTES CON VÁLVULAS Y 1 SALIENTE

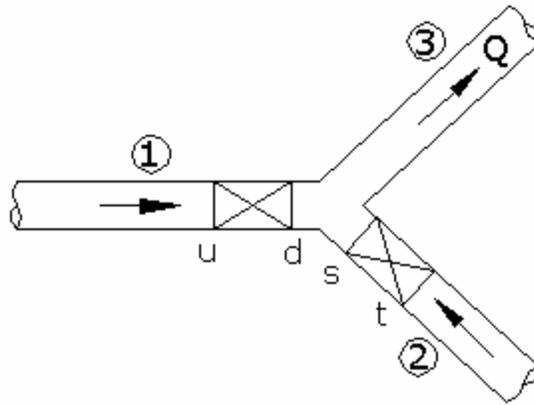


FIGURA 17. Condición de Borde de Nodo con 3 Tubos, 2 entrantes con Válvula y 1 Saliente.

Las ecuaciones a resolver en este tipo de nodo son:

$$\text{En tubo \#1, } C^+: \quad Vp_1 = C_1 - C_2 Hp_{1U}$$

$$\text{En tubo \#2, } C^+: \quad Vp_2 = C_3 - C_4 Hp_{2T}$$

$$\text{En tubo \#3, } C^-: \quad Vp_3 = C_5 + C_6 Hp_3$$

Ec. de continuidad:  $Vp_1A_1 + Vp_2A_2 = Vp_3A_3$

Ec. de energía entre U y D:  $Hp_{1U} = Hp_{1D} + K_{L1} \frac{Vp_1^2}{2g}$

Ec. de la energía entre T y S:  $Hp_{2T} = Hp_{2S} + K_{L2} \frac{Vp_2^2}{2g}$

Partiendo de la premisa que la energía en el nodo Hp es común para todos los tubos, se tiene que:

$$Hp = Hp_{1D} = Hp_{2S} = Hp_3$$

Además, si en el sistema de ecuaciones anterior se hace:

$$E_{C1} = \frac{Vp_1^2}{2g} \quad \text{y} \quad E_{C2} = \frac{Vp_2^2}{2g}$$

Entonces resulta un sistema de 6 ecuaciones lineales con 6 incógnitas:  $Vp_1$ ,  $Vp_2$ ,  $Vp_3$ ,  $Hp_{1U}$ ,  $Hp_{2T}$  y  $Hp$

En la solución numérica,  $E_{C1}$  y  $E_{C2}$  se calculan con las velocidades  $Vp_1$  y  $Vp_2$  respectivamente, evaluadas en el tiempo inmediatamente anterior. Esto permite

evitar los términos cuadráticos y obtener un sistema de ecuaciones lineales, cuya solución es:

$$Hp = \frac{C_1 A_1 - C_2 A_1 K_{L1} E_{C1} + C_3 A_2 - C_4 A_2 K_{L2} E_{C2} - C_5 A_3}{C_2 A_1 + C_4 A_2 + C_6 A_3}$$

$$Hp_{1U} = Hp + K_{L1} E_{C1}$$

$$Hp_{2T} = Hp + K_{L2} E_{C2}$$

$$Vp_1 = C_1 - C_2 (Hp + K_{L1} E_{C1})$$

$$Vp_2 = C_3 - C_4 (Hp + K_{L2} E_{C2})$$

$$Vp_3 = C_5 + C_6 Hp$$

Esta solución es válida siempre que  $Vp_1$  y  $Vp_2$  se mantengan en las direcciones asumidas originalmente. Si  $Vp_1$  o  $Vp_2$  da un valor negativo, significaría que su sentido es contrario al asumido originalmente, por lo que es necesario resolver de nuevo el sistema de ecuaciones para flujo en dirección opuesta.

## 2.25 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA RÉGIMEN TRANSITORIO, BASADO EN EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

El diagrama de flujo del programa principal para régimen transitorio está en la figura 18; mientras que el diagrama de flujo de la subrutina “Condiciones de Borde” usada en dicho programa, se encuentra en el anexo 5.

## 2.26 PROGRAMA EN FORTRAN PARA EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

Se usó el lenguaje Fortran para elaborar el programa de régimen transitorio. Este código fuente está en el anexo 4 y contiene los suficientes comentarios para ayudar a comprender el funcionamiento del mismo.

## 2.27 INSPECCIÓN DEL PROGRAMA

- **ATENUACIÓN:** Un efecto claro en los resultados del modelo teórico, es la amortiguación en el tiempo que experimenta la onda de presión, en cada uno de los nodos analizados (véase figuras 35 al 40). Esto se corresponde con la conducta física real de la presión en el sistema.

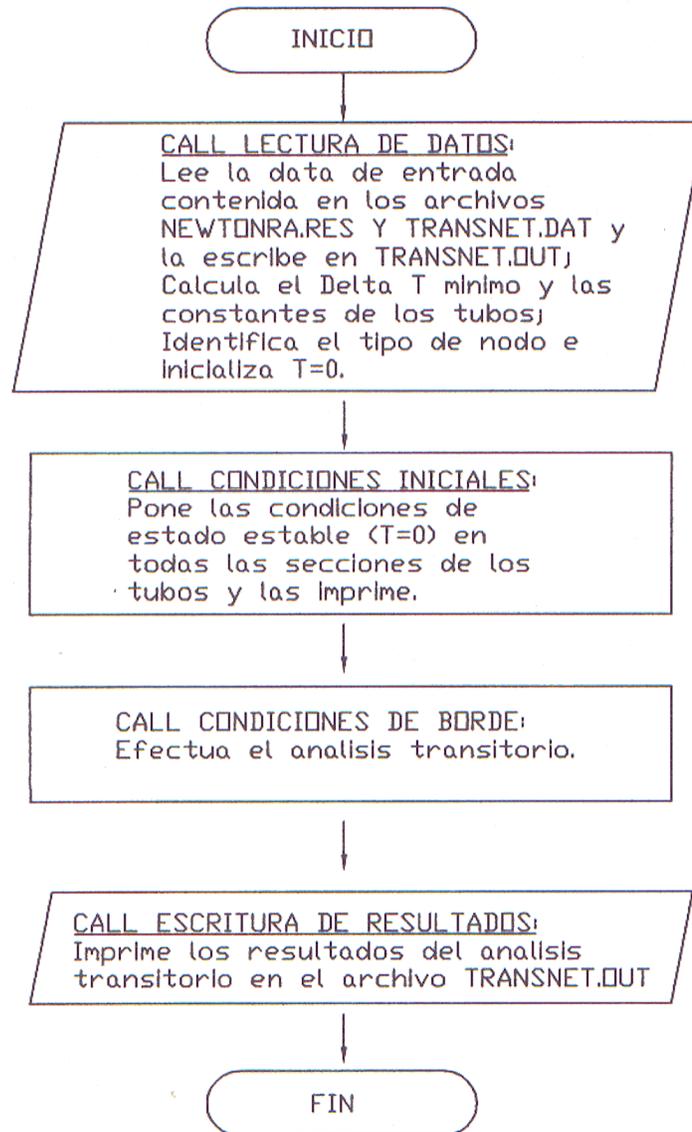


Figura 18. Diagrama de Flujo del Programa Principal para Régimen Transitorio

- **PROPAGACIÓN:** También se puede apreciar en los resultados del modelo, que la onda de presión generada en el nodo 1, alcanzará instantes después los nodos vecinos, sufriendo atenuaciones y eventuales ampliaciones, como consecuencia de los efectos de la disipación de energía. Por aplicación del principio de superposición de efectos, la presión en cualquier nodo del sistema para un determinado tiempo  $t$ , será igual al valor de la presión estable inicial, aumentada en la suma de las magnitudes de todas las ondas de presión (positivas o negativas), que están pasando por ese nodo en ese instante.
  
- **CONTINUIDAD EN LOS NODOS:** También se puede comprobar que el programa cumple con la continuidad en los nodos. Para verificarlo, se selecciona por ejemplo el nodo 2, con los tubos #1, #2 y #7 conectados al mismo, y sus respectivos caudales  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_7$ , asumidos positivos si tienen el sentido indicado por la solución de régimen estable, como muestra la Figura 19.

Debido a que los tubos conectados al nodo 2 son de igual diámetro, se hará referencia a sumatoria de velocidades en el nodo, en vez de sumatoria de caudales.

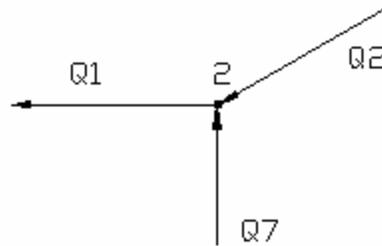


Figura 19. Sentido de los Caudales Estables en el Nodo 2

Una corrida de este programa para transitorios, denominado TRANSNET.f90, con la data de la Red #1, arrojó las siguientes velocidades en los tubos 1, 2 y 7 para cinco valores de tiempo arbitrariamente seleccionados (véase tabla 2 y anexo 2):

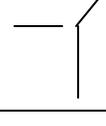
TIEMPO (seg.)	$V_1$ (pie/seg.)	$V_2$ (pie/seg.)	$V_7$ (pie/seg.)	$Q_i$ Resultantes
0,080	4,07	2,24	1,83	
0,112	0,43	1,17	-0,73	
0,320	-0,40	-1,18	0,80	
0,880	-0,11	-0,32	0,21	
1,200	0,10	-0,02	0,12	

TABLA 2. Velocidades Transitorias en el Nodo 2

Donde un signo negativo en las velocidades indica que el sentido es contrario al asumido y debe ser invertido. Se puede comprobar, por ejemplo, que para un tiempo de 1,200 seg. se debe invertir  $V_2$ , y de acuerdo al esquema de flujo resultante, se debe cumplir que:

$$V_1 + (-1)V_2 = V_7$$

$$0,10 + 0,02 = 0,12$$

$$0,12 = 0,12$$

- Se hizo un test al programa de análisis de transitorios para ver su capacidad para converger a una situación final de estado estable conocida, a partir de una situación de no equilibrio en la Red #1, generada en el modelo computacional, por el cierre rápido de la válvula de bola. El modelo produjo un transitorio que fue progresivamente amortiguado por la fricción, hasta que la energía cinética se hizo igual a cero y predominaron las presiones estáticas en todos los nodos de la red. Es decir, se permitió que el programa trabajara durante el tiempo suficiente para que convergiera a una solución de estado estable, donde las alturas de presión transitorias en los nodos, se hicieron igual a las alturas de presión estática  $P_i / \gamma$  medidas en los mismos, y las velocidades  $V_i$  en los tubos, se anularon. Esta prueba es sencilla de reproducir. Simplemente, ingresando la data de la red y simulando un cierre de válvula en el nodo1 (Tiempo de cierre igual a 0,1233 seg.), se hace correr el programa por un tiempo exagerado igual a 47,984 seg. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente Tabla 3:

NODO	COTA (pié)	H <sub>modelo</sub> (pié)	(P/γ) <sub>modelo</sub> (pié)	(P/γ) <sub>experimt.</sub> (pié)
9	10,203	44,01	33,81	33,82
3	10,203	44,00	33,80	33,82
1	5,839	43,97	38,13	38,18
6	10,203	43,98	33,78	33,82
5	10,203	44,01	33,80	33,82
4	10,203	43,98	33,77	33,82

TABLA 3.  $(P/\gamma)_{\text{modelo}}$  a los 47,984 seg. y  $(P/\gamma)_{\text{experimt}}$

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el hecho que la tercera y cuarta columna converjan separadamente a una constante, indica que el modelo ha arribado a una solución estable. La quinta columna, que es la altura de presión estática, es producto de restar la cota medida en el nivel del agua del tanque superior (44,027 pie), menos la cota medida en el nodo.

El hecho que la onda de presión calculada por el modelo en cada nodo de prueba, se aproxime bastante bien a la onda de presión medida, constituye una evidencia de que el programa está funcionando correctamente.

## 2.28 DEFINICIÓN DE COEFICIENTES DE REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN.

Las ecuaciones gobernantes 29 y 30 pueden ser simplificadas debido a que en la mayoría de los casos prácticos  $V \ll a$ , por lo que los términos convectivos de la aceleración  $V\partial H/\partial x$  y  $V\partial V/\partial x$  son muy pequeños comparados con los demás términos y pueden ser despreciados. Lo mismo sucede con el término de la pendiente de la tubería. Si adicionalmente se ignora la fricción, entonces queda el denominado modelo de Allievi:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

que se puede poner en función del caudal, utilizando la relación  $Q = VA$ , donde  $A$  es el área de la sección transversal de la tubería, que se asumirá como constante. Entonces se tiene que  $\partial V/\partial t = (1/A) \partial Q/\partial t$  y  $\partial V/\partial x = (1/A) \partial Q/\partial x$ , por lo que el sistema anterior se transforma en:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{ec. 85})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (\text{ec. 86})$$

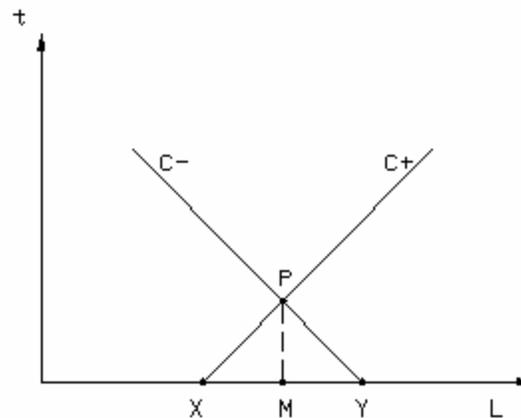


Figura 20 Las Características como Líneas de Transmisión de Información

Se puede recurrir otra vez al método de las características para aplicarlo al sistema de ecuaciones anterior, a fin de transformarlo a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. El método supone que el par de ecuaciones diferenciales parciales anteriores puede ser reemplazado por una combinación lineal de ellas mismas. Se puede multiplicar la ec. 86 por un factor  $\lambda$  y luego agregarle la ec. 85, como se describe a continuación:

$$\mathbf{I} \frac{\partial Q}{\partial t} + \mathbf{I} \cdot gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{ec. 87})$$

la cual se puede reescribir como sigue:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \mathbf{I} \cdot gA \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \left[ \mathbf{I} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} \right] = 0 \quad (\text{ec.88})$$

En la cual los términos entre corchetes pueden ser reemplazados por sus equivalentes, si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\left[ \frac{\partial H}{\partial t} + I \cdot gA \frac{\partial H}{\partial x} \right] = \frac{dH}{dt}, \text{ solo si } \frac{dx}{dt} = I \cdot gA \quad (\text{ec. 89})$$

$$\left[ I \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} \right] = I \frac{dQ}{dt}, \text{ solo si } I \frac{dx}{dt} = \frac{a^2}{gA} \quad (\text{ec. 90})$$

Despejando  $\frac{dx}{dt}$  de las ecuaciones condicionantes 89 y 90, e igualando, se obtiene

que  $I = \pm \frac{a}{gA}$ .

Para  $I = \frac{a}{gA}$ , las ecuaciones condicionantes dan  $\frac{dx}{dt} = a$  y la ec. 88 se

transforma en:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{solo si } \frac{dx}{dt} = a \quad (\text{ec. 91})$$

Para  $I = -\frac{a}{gA}$ , las ecuaciones condicionantes dan  $\frac{dx}{dt} = -a$  y la ec. 88 se

transforma en:

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (\text{ec. 92})$$

Si se multiplica la ec. 91 por  $\left(\frac{gA}{a}\right)$  y la ec. 92 por  $\left(-\frac{gA}{a}\right)$ , se pueden describir

ambas como:

$$C^+: \quad \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (\text{ec. 93})$$

$$C^-: \quad \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} = 0 \quad \text{solo si} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (\text{ec. 94})$$

En estas ecuaciones, las diferenciales totales pueden integrarse de manera exacta entre dos puntos de la misma característica. Al integrar, utilizando la notación:

$$B = \frac{a}{gA}$$

se obtiene, (ver Figura 20)

$$C^+ : \quad H(P) = H(X) - B[Q(P) - Q(X)] \quad (95)$$

$$C^- : \quad H(P) = H(Y) + B[Q(P) - Q(Y)] \quad (96)$$

Los efectos disipativos de la fricción posibilitan el progresivo amortiguamiento de las fluctuaciones de presión. Aunque, obviamente, la consideración de la fricción puede ser importante, es posible deducir resultados muy útiles e interesantes, en base a las ecuaciones simplificadas anteriores, para la mejor comprensión del mecanismo de reflexión y transmisión de las ondas elásticas en las diferentes discontinuidades del sistema. Como ocurre frecuentemente en los problemas de fluidos, el estudio del problema sin fricción, si bien puede dar soluciones que no se ajustan cuantitativamente al comportamiento real, permite profundizar en el conocimiento del fenómeno físico.

En todo nodo en el que confluyan tuberías de diferentes propiedades, la ecuación de continuidad debe satisfacerse en cada instante de tiempo, es decir, no existe almacenamiento en el nodo. Además, se admite una altura piezométrica única en el nodo en cada instante de tiempo. Esta última hipótesis se obtiene al plantear la ecuación de la energía y considerar despreciables las pérdidas menores en la unión, así como las alturas cinéticas. Esta simplificación, aunque no estrictamente necesaria, resulta aceptable en la mayoría de los casos, y facilita notablemente los cálculos.

Fijadas y justificadas las hipótesis anteriores, se pretende describir el proceso global de transmisiones y reflexiones, a que las perturbaciones están sujetas en los sistemas complejos.

La Figura 21 representa el tramo intermedio de un sistema compuesto por dos tuberías en serie presentando una determinada variación de sección ( $A_1 \neq A_2$ ) y que transporta, en régimen permanente, un caudal  $Q_0$ .

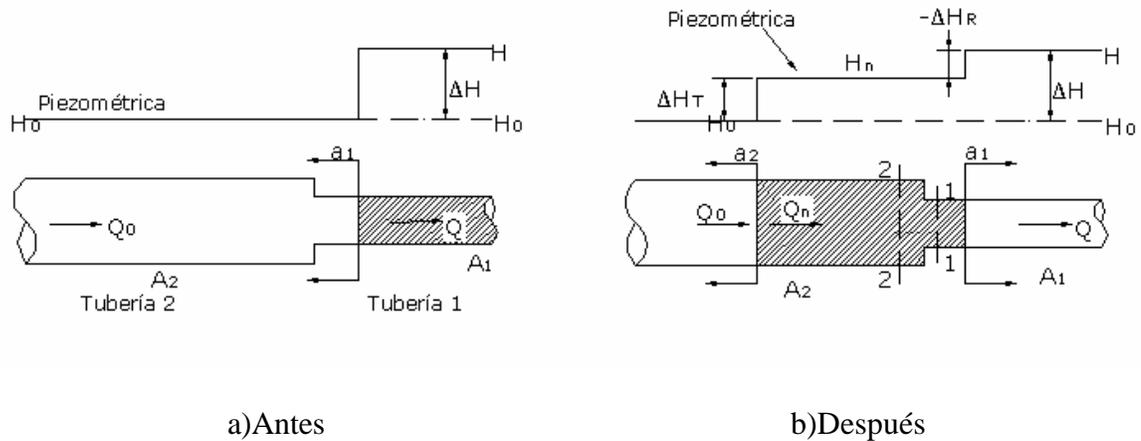


Figura 21 Sistema de Tuberías en Serie.

Supongase que en su extremo aguas abajo se genera una perturbación, por ejemplo, debido al cierre parcial de una válvula, dando origen a una onda de presión,  $\Delta H$ . Esta onda viajará con una celeridad  $a_1$  a través de la tubería 1, y en determinado instante  $t$  se encontrará en las proximidades de la conexión de las tuberías (nodo) como se representa en la figura 21 a). Al llegar al nodo, la onda se transmite parcialmente a la tubería 2 originándose simultáneamente una onda reflejada en la tubería 1. La figura 21 b) representa la situación momentos después del instante en el cual la perturbación ha alcanzado el nodo.

Por aplicación del principio de superposición de efectos, la presión (altura piezométrica) en cualquier sección del sistema en un determinado instante  $t$  será igual al valor de la presión inicial aumentando en la suma de las magnitudes de todas las ondas de presión (positiva o negativa) que han pasado por esa sección hasta ese instante. Luego para dos secciones 1-1 y 2-2, respectivamente inmediatamente aguas abajo y aguas arriba del nodo, se puede escribir:

$$H_1 = H_0 + ?H + ?H_R = H + ?H_R$$

$$H_2 = H_0 + ?H_T$$

Por otro lado, al estar admitiendo una altura piezométrica común en el nodo en cada instante de tiempo se tiene  $H_1 = H_2 = H_n$ , por lo que las magnitudes de las ondas reflejadas y transmitidas viene dadas respectivamente por:

$$?H_R = H_n - H \quad (97)$$

$$?H_T = H_n - H_0 \quad (98)$$

Las magnitudes de las ondas de presión reflejadas y transmitidas se pueden relacionar con la magnitud de la onda incidente a través de los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente.

Se define el **coeficiente de reflexión**, para la tubería por donde viaja la perturbación, como la relación entre el incremento de presión reflejado en esta tubería y el incremento de presión correspondiente a la perturbación incidente en el nodo:

$$r = \frac{\Delta H_R}{\Delta H} \quad (99)$$

El **coeficiente de transmisión** será la relación entre el incremento de presión transmitido a la tubería que no estaba afectada por la perturbación (tubería 2) y el incremento de presión correspondiente a la perturbación incidente:

$$s = \frac{\Delta H_T}{\Delta H} \quad (100)$$

Restando (97) y (98), se tiene

$$\Delta H_R = \Delta H_T - \Delta H$$

de donde se deduce

$$r = s - 1 \quad (101)$$

Esta definición de coeficientes de reflexión y transmisión, se puede generalizar a un nodo genérico donde converjan "n" tuberías (figura 22). En el caso de una onda de presión que llega al nodo a través de cualquiera de las tuberías, por ejemplo, a través de la tubería 1, esa onda se transmite a las restantes n-1 tuberías, al tiempo que una onda reflejada viajará a través de la tubería 1.

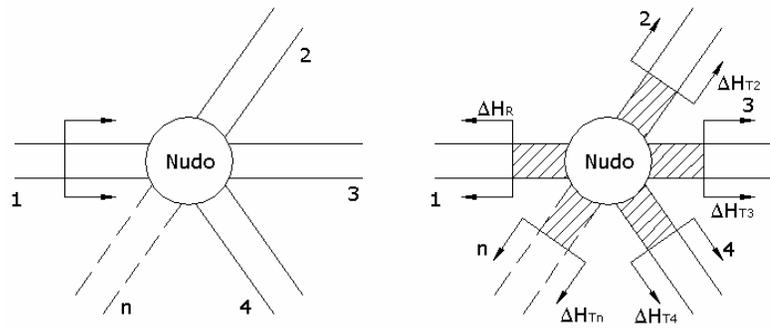


Figura 22 Nodo de Unión Genérico.

El coeficiente de reflexión, de acuerdo con su definición, seguiría dado por la ec. ( 99 ), mientras el coeficiente de transmisión, será ahora la relación entre el incremento de presión transmitido a cada una de las restantes tuberías, y el incremento de presión correspondiente a la perturbación incidente, o sea,

$$s_i = \frac{\Delta H_{T_i}}{\Delta H} \quad i = 2, 3, \dots, n$$

De forma análoga al caso anterior, la aplicación del principio de superposición de efectos y la hipótesis de una altura piezométrica común en el nodo en cada instante de tiempo, permiten escribir:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_3} = \dots = \Delta H_{T_n} = \Delta H + \Delta H_R$$

o sea, el coeficiente de transmisión es igual para todas las tuberías conectadas el nodo, y la relación (101) se mantiene válida.

A los fines del presente trabajo, estas definiciones previas son suficientes para ayudar a visualizar, el comportamiento de las ondas de presión al atravesar una discontinuidad. La referencia bibliográfica 25 trata con mayor profundidad la reflexión y transmisión de ondas.

### **3. EL MODELO EXPERIMENTAL**

El modelo experimental lo constituye la red que se describió en la figura 1. La misma fue acondicionada para permitir las mediciones de presión y caudal en régimen estable y las mediciones de presión en régimen transitorio.

#### **3.1 METODOS, TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES**

Los principales instrumentos usados en las mediciones fueron el medidor de caudal y el sistema de adquisición de datos. Fue necesario también elaborar un software de adquisición de datos en el lenguaje LabVIEW.

### 3.1.1 QUE ES Lab VIEW?

LabView es un lenguaje de programación gráfica que usa iconos en vez de líneas de texto, para crear aplicaciones. En contraste con los lenguajes de programación basado en texto, donde las instrucciones determinan la ejecución del programa, LabView utiliza la programación en diagrama de bloques, donde los datos determinan la ejecución. Este es un poderoso lenguaje de programación para instrumentación y control, y adquisición de datos. Actualmente, es usado por ingenieros y científicos para crear soluciones de adquisición, análisis y presentación de datos, así como de medición y automatización.

Con LabView se construye una interfase de usuario usando un conjunto de herramientas y objetos. Esta interfase se denomina Panel Frontal y sirve para que el usuario interactúe con el programa. El código fuente se construye usando las representaciones gráficas de las funciones que sirven para controlar los objetos en el panel frontal. El diagrama de bloque contiene este código fuente. Si se organiza adecuadamente, el diagrama de bloques se parece un diagrama de flujo.

Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales, simplemente Vis, debido a que su apariencia y funcionamiento, simula instrumentos físicos tales como osciloscopios, multímetros, termómetros, manómetros, etc.). Cada VI contiene funciones que efectúan operaciones con los datos provenientes de la interfase de usuario (el panel frontal) u otras fuentes ( transductores, termocuplas, etc.), y muestran esa información, o la mueven a otros archivos o computadores.

Un VI contiene los tres componentes siguientes:

- Panel Frontal: Sirve como interfase de usuario.
- Diagrama de Bloque: Contiene el código fuente gráfico que define la funcionalidad del VI.
- Cuadro de Icono y Conector: Identifica el VI para poder usarlo en otro VI. Un VI dentro de otro VI, se denomina Sub VI. Un sub VI se corresponde con el concepto de subrutina en los lenguajes de programación basados en textos.

### 3.1.2 PROGRAMAS EN LabVIEW 6.0 PARA LA ADQUISICIÓN Y GRAFICACIÓN DE DATOS DE PRESIÓN

Se elaboró un programa en LabVIEW 6 (un VI, instrumento virtual) para la adquisición de datos de presión y otro para graficar la data adquirida, denominados “Cont Acq to SpreadSheet File Denis.vi” y “Display Acq’d SpreadSheet File Denis.vi”, cuyos respectivos paneles frontales se pueden observar en las figuras 23 y 24. Los correspondientes códigos fuentes gráficos están contenidos en el anexo 1.

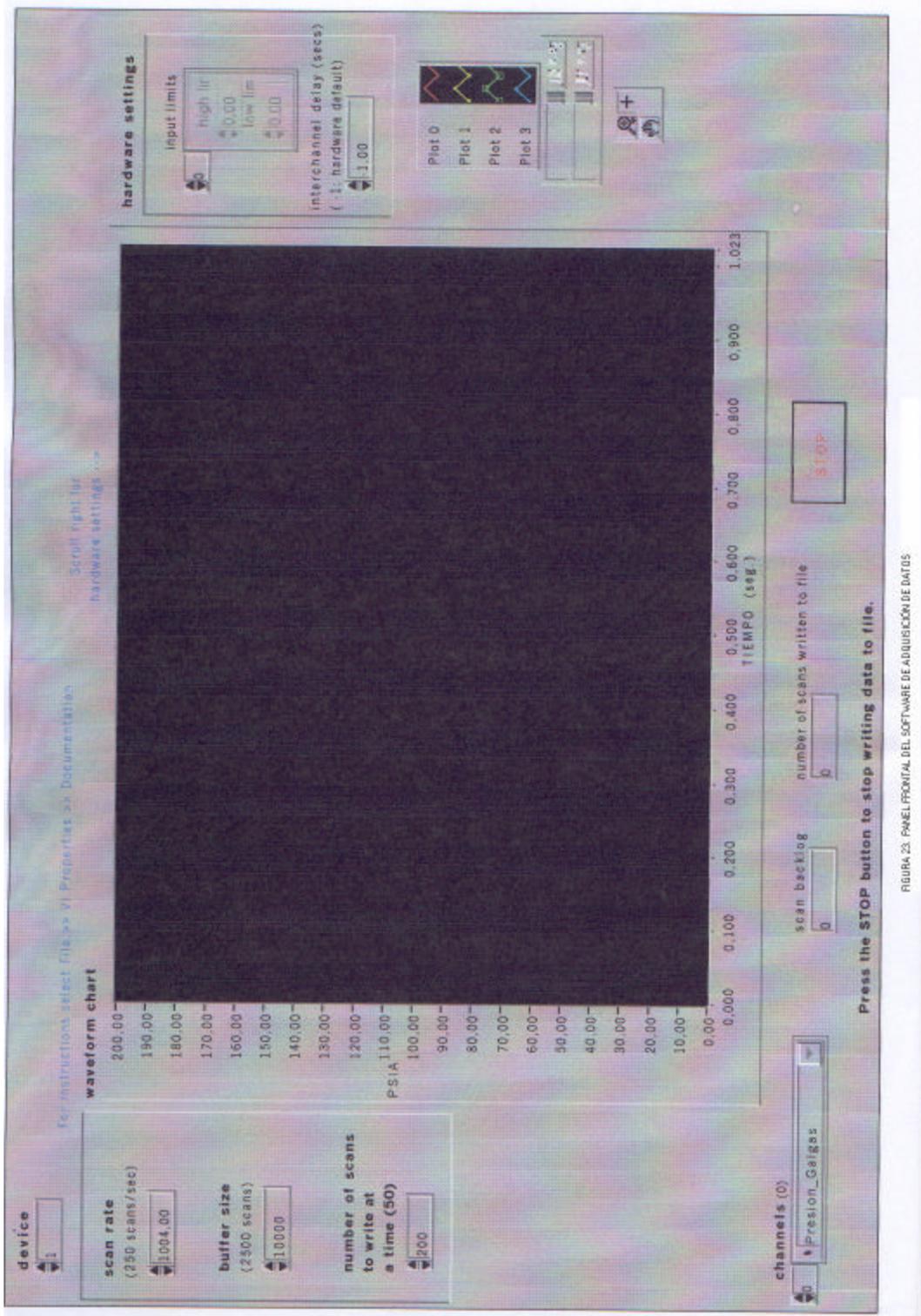


FIGURA 23. PANELEFRONTAL DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

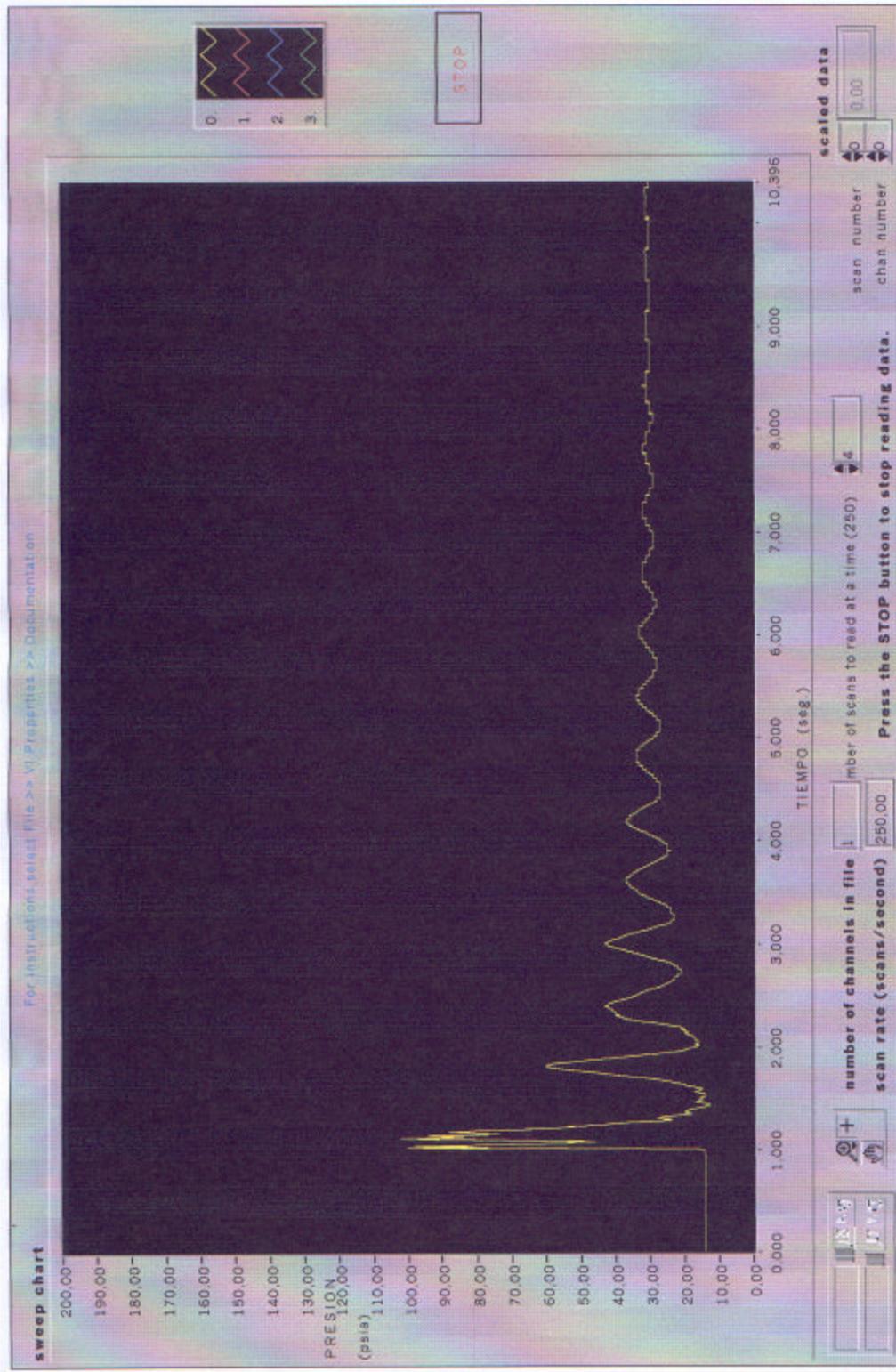


FIGURA 24. PANEAL FRONTAL DEL SOFTWARE DE ORGANIZACION DE DATOS

Procedimiento para adquirir la data:

- Instalar físicamente todo el equipo de adquisición
- Probar la señal con el software MAX.
- Abrir el archivo: Cont Acq to Spreadsheet File Denis.vi
- Correr este VI con “⇒”.
- Introducir el nombre del archivo y la ubicación para salvar la data adquirida.
- Hacer click en botón “Save” y luego de transcurrir el tiempo estimado para la adquisición, hacer click en botón “stop”.
- Cerrar el VI.

Nota: MAX es el software de configuración del sistema de adquisición de datos.

Procedimiento para graficar la data adquirida:

- Abrir el archivo: Display Acq'd Spreadsheet File Denis.vi
- Correr este VI con el botón “⇒”
- Introducir el nombre del archivo donde fue salvada la data adquirida y hacer click en “open”. Acontinuación aparecerá la grafica de los datos adquiridos.
- Cierre el VI.

Nota: La información contenida en el archivo donde se salvo la data adquirida también puede importarse desde excel.

Calculo de los Parámetros “m” y “b” de la Ecuación de Escalamiento  $y = mx + b$ :

Tipo de escala seleccionada: lineal,  $y = mx + b$ , donde  $y$  = data escalada,  $x$  = data original;  $m$  y  $b$  son constantes que deben calcularse e introducirse en MAX.

1. Si se alimenta el transductor de presión con 10 volts. dc:

Ya que la sensibilidad del transductor es de 3 mV/V, entonces:

$$\left\{ 10V \rightarrow 30mV(0.03Volts) \Rightarrow m = \frac{300 \text{ psia}}{0.03V} = 10000 \frac{\text{psia}}{\text{Volt}} \quad y \quad b = 0 \right\}$$

2. Si se alimenta el transductor de presión con 2,5 volts. dc:

Ya que la sensibilidad del transductor es de 3 mV/V, entonces:

$$\left\{ 2,5V \rightarrow 7,5mV(0.0075Volts) \Rightarrow m = \frac{300 \text{ psia}}{0,0075V} = 40000 \frac{\text{psia}}{\text{Volt}} \quad y \quad b = 0 \right\}$$

En este estudio se usó  $b=0$  y  $m= 40000$  para todas las mediciones ya que el transductor fue alimentado con 2,5 V dc. Esta escala fue probada en un aparato especialmente diseñado y construido para generar presiones mediante un mecanismo cilindro-piston y excitar al transductor (véase figura 25). El plano de este dispositivo fue hecho en AUTOCAD 2000 y está en la figura 26.



FIGURA 25. Generador de Presiones

### 3.1.3 OPERACIÓN DEL SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN “MAX”

#### Procedimiento para probar la señal con el software MAX:

- Se abre MAX desde el escritorio.
- Se hace doble click en “DATA NEIGHBORHOOD”.
- Se selecciona el canal “Presión\_Galgas” (Canal 1)
- Se hace right clic en “Presión\_Galgas” y se selecciona TEST.
- Luego, calibrar el modulo de acondicionamiento.

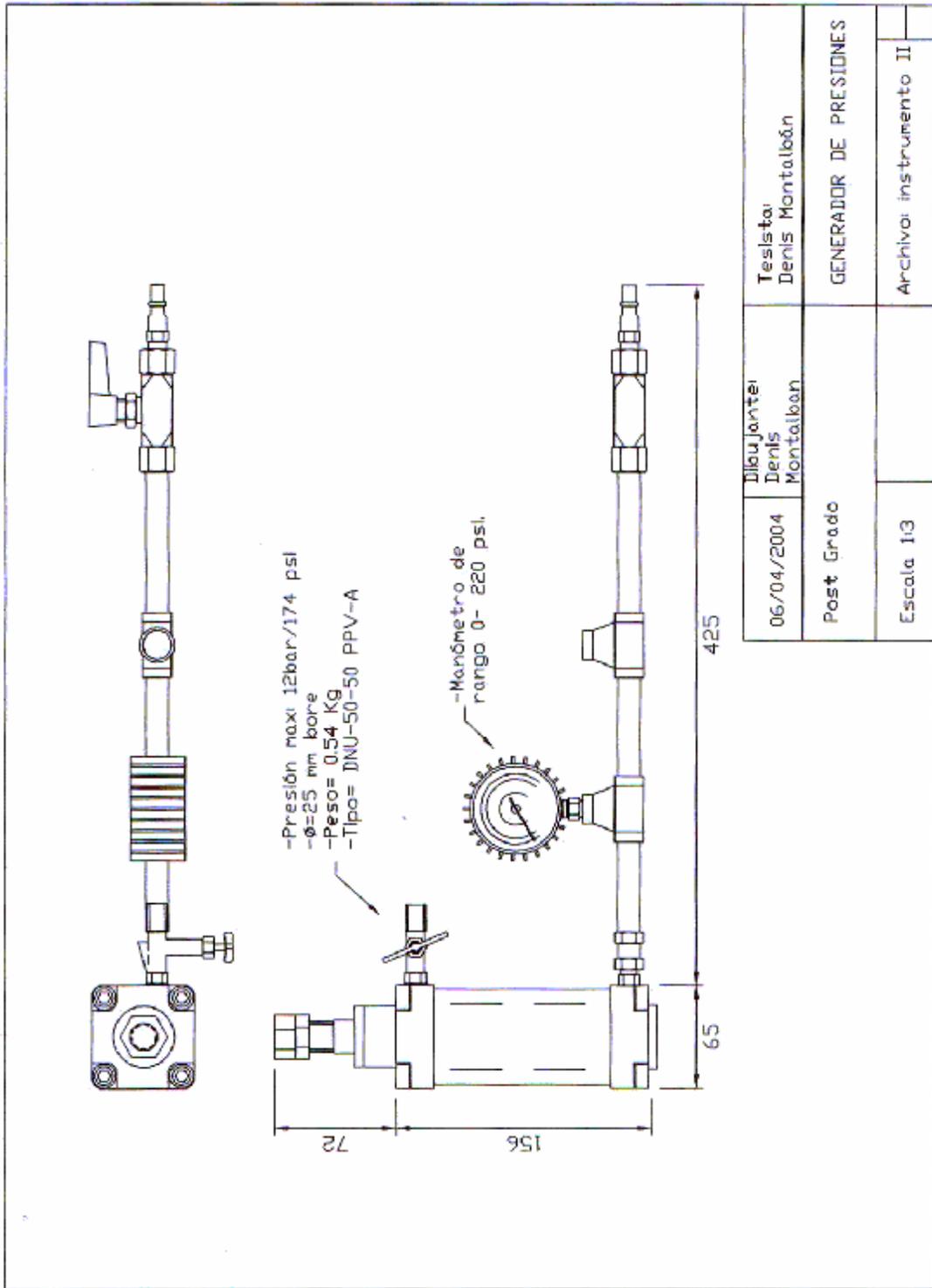


FIGURA 26. GENERADOR DE PRESIONES

Procedimiento para insertar un nuevo canal virtual:

- Se hace right click en “DATA NEIGHBORHOOD” y se selecciona “CREATE New”, “Virtual Channel”, Finish. Use el “DAQ CHANNEL Wizard” para configurar el canal virtual.

Procedimiento para ver o cambiar las propiedades del canal:

- Hacer “Right Click” sobre el nombre del canal en el árbol de configuración y selecciona “Properties”.

Procedimiento para modificar las propiedades de la escala:

- Hacer doble click en “Scales”
- Hacer Right click en el nombre de la escala a modificar y seleccionar “Properties”.

Procedimiento para configurar el hardware:

- Hacer doble click en “DEVICES and INTERFACES”.
- Seleccionar DAQCARD-6024E.
- Hacer Right click en esa selección y seleccionar properties.
- Seleccione la carpeta “Accesory”.
- Seleccione el accesorio “SC-2345”
- Haga click en el botón “Configure”.
- Ya se puede agregar (o quitar) acondicionadores de señal, al bloque conector, especificando los tipos de acondicionadores que van en cada jumper.

### 3.1.4 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Para medir las presiones nodales tanto en régimen estable como en régimen transitorio, se usó un hardware de adquisición de datos cuyas características técnicas son:

#### Tarjeta PCMCIA de Adquisición de Datos:

Marca: National Instruments.

Modelo: DAQCard-6024E.

Entradas Analógicas: 16 canales de terminal común / 8 canales diferenciales.

12 bits de resolución.

Velocidad de Muestreo: 200 K muestras/seg.

Velocidad de Entrada a Disco: 200 K muestras/seg.

Salidas Analógicas: 2 canales.

12 bits de resolución.

Rangos de la Señal de Entrada:  $\pm 0,05$  hasta  $\pm 10$  V.

Entrada / Salida Digitales: 8 líneas.

Contadores / Temporizadores: Dos de 24 bits.

Disparos: Digitales.

Software controlador: NI-DAQ para Windows 2000/NT/Me/9x.

Software de Aplicación: LabVIEW, Lookout, Measurement Studio, Measure y

VirtualBench.

Software de Configuración y Prueba: Measurement and Automation Explorer (MAX)

Porta Módulos:

Marca: National Instruments.

Modelo: SC-2345 Connector Block con Módulo de alimentación SCC-PWR01.

Alimentación: + 5 V dc  $\pm$  5% (desde una fuente externa) o +5 Vdc (desde la tarjeta DAQCard-6024E).

Salida: +5 Vdc, 100% de eficiencia.

$\pm$ 15 Vdc, 62% de eficiencia.

Número de Canales de Entrada Analógica: 16 de terminal común.

Número de Canales de Salida Analógica: 2

Conexiones de Entrada / Salida Analog.: 16, conectores de 20 pines para entrada analógica.

2, conectores de 20 pines para salida analógica.

1, conector de 20 pines para energía externa.

Conexiones de Entrada / Salida Digitales: 8, conectores de 20 pines para DIO (compartido con entrada analógica)

Temperatura de Operación: 0 a 70 °C.

Dimensiones: 24,1 x 26,2 x 3.937 cm.

Software controlador: NI-DAQ para Windows 2000/NT/Me/9x.

Software de Aplicación: LabVIEW, Lookout, Measurement Studio.

Software de Configuración y Prueba: Measurement and Automation Explorer (MAX)

### Módulos de Acondicionamiento de Señal

Marca: National Instruments.

Modelo: SCC-SG04

Tipo: Galgas extensiométricas de puente completo.

Número de Canales: 2.

Ganancia: 100

Rango de la Señal:  $\pm 100$  mV

Filtro Paso Bajo: 1,6 KHz

Fuente de Excitación: 2,5 V.

Software Controlador: NI-DAQ.

Software de Configuración y Prueba: Measurement and Automation Explorer (MAX).

### Transductor de Presión

Marca: Omega.

Modelo: PX6000C1-300AV

Alimentación Nominal: 10 V (15 V max.)

Salida: 3 mV/V  $\pm 10\%$  alimentación nominal.

Resistencia de Entrada: 2500 ohms mínimo.

Resistencia de Salida: 1000 ohms mínimo, 1500 ohms máximo.

Balance Cero: 0 mV  $\pm 5\%$  FSO.

Conexión Eléctrica: Conector Twist Lock – Ext. Temp.

Elemento Sensor de Presión: Circuito puente de 4 ramales activos que opera con un sensor

de diafragma micromaquinado de silicio.

Sensor de Temperatura: Resistencia de salida a 24 °C, de 900 a 1500 ohms.

Precisión: Linealidad, histéresis y repetitividad combinadas  $\leq 0,25\%$  FSO e todos los rangos.

Temperatura de Operación: -54 a 150 °C.

Rango de Presión Nominal: 0 a 300 psi.(absolutos).

Presión Máxima: 2,5 veces el rango de presión nominal.

Conexión de Presión: 1/4-18 NPT macho.

### 3.1.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

Para medir los caudales en régimen estable de todos los tramos de la red, se usó un medidor de caudal ultrasónico cuyas características técnicas son:

Marca: Panametrics.

Modelo: TransPort PT868.

Dos salidas analógicas lineales: 4 – 20 mA , o 0 - 20 mA

Rango de Velocidades: desde  $\pm 0,03$  hasta  $\pm 12$  m/seg. ( $\pm 0,1$  hasta  $\pm 40$  pie/seg.)

Alimentación: Baterías recargables 4-C NiCad o módulo AC externo (entrada: 120 VAC 60 Hz., 5W y salida: 12 VDC).

Potencia de operación: 6 W máximo.

Tamaño/Peso: 12,7 x 22,9 x 5,8 mm. / 1 Kg.

Temperatura de Operación: -10 °C hasta 50 °C.

Transductores Ultrasónicos: Marca Panametrics, tipo Clamp-On Standard, 1 MHz., -40 °C hasta 100 °C

### 3.1.6 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Las mediciones de presión en régimen estable se efectuaron con el sistema de adquisición, en todos los nodos de la red, excepto el nodo 12 que quedó sin medición, por ser inaccesible.

Para medir el transitorio, se seleccionaron los nodos 9, 3, 1, 6, 5 y 4 de la Red #1 como nodos de prueba y se acondicionaron. En cada uno de estos nodos se conectó el transductor de presión para medir primero las presiones iniciales en régimen estable y luego adquirir la data de presión con el sistema de adquisición de datos, una vez generado el transitorio en el nodo 1. Este sistema se muestra en la figura 27.



FIGURA 27. Sistema de Adquisición de Datos de Presión

### 3.1.7 PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

La medición se hizo usando el medidor ultrasónico de caudal PT 868 de Panametrics, que se puede apreciar en la Figura 28. Es un instrumento, pequeño, liviano, portátil y fácil de usar.

Antes de hacer las mediciones, este instrumento debe ser preparado para su operación. Esto incluye su conexión a dos transductores ultrasónicos y su calibración para determinar la distancia exacta de separación entre los mismos. El PT 868 trabaja bajo el principio del tiempo de tránsito y cuenta con 2 transductores. Cada transductor funciona tanto como transmisor, generando cierto número de pulsos acústicos y luego como receptor para un idéntico número de los mismos. El intervalo de tiempo entre la transmisión y recepción de la señal ultrasónica es medido en dirección aguas arriba y aguas abajo.

Cuando el líquido en la tubería no está en movimiento, el tiempo de tránsito en ambas direcciones es igual. Si el líquido está fluyendo, el tiempo de tránsito corriente abajo es menor que el tiempo de tránsito corriente arriba. La diferencia entre estos tiempos es proporcional a la velocidad del flujo líquido y su signo indica la dirección del mismo.

Los transductores utilizados por el PT 868 son del tipo no húmedos y montados externamente en la tubería, pueden medir la velocidad del flujo a través del metal, plástico e incluso tuberías de concreto, sin penetrar las paredes de la misma.

En este trabajo se utilizó un transductor modelo n° 24 que es el apropiado para hacer mediciones de flujo en tuberías de diámetros comprendidos entre ½” y 2”.

Las mediciones de caudal se hicieron solo en régimen estable ya que este aparato no sirve para adquirir caudal en fracciones de segundos del orden de las milésimas.



FIGURA 28. Medidor Ultrasónico de Caudal

### 3.1.8 CONDICIONES AMBIENTALES Y PROPIEDADES DEL AGUA

Las condiciones ambientales en el laboratorio de hidráulica y las propiedades del agua a esas condiciones, fueron las siguientes:

Presión atm. = 14,65 psia.= 33,91 pié de agua.

Temperatura = 80 °F

Presión de vapor = 0,5073 psia.= -14,14 psig .=-32,74 pié de agua.

Peso específico = 62,2 Lb / pié<sup>3</sup>.

Viscosidad cinemática =  $9,15 \times 10^{-6}$  pié<sup>2</sup>/seg.

### 3.2 DETERMINACIÓN DE $K_L$

El procedimiento para resolver numéricamente el problema transitorio fue descrito previamente. Interesa ahora encontrar  $K_L$  como una función de tiempo. Si hay ensayos disponibles para la válvula involucrada, que describan  $K_L$  como una función de las posiciones del obturador (grados o porcentaje de apertura), entonces estos pueden ser ingresados al computador como una tabla en la cual se pueda interpolar, o como una curva que represente el comportamiento de la válvula. Si hay sólo dos o tres puntos disponibles en la data, entonces se requiere más trabajo para establecer la correlación  $K_L$  vs. Porcentaje de Apertura (o  $K_L$  vs. Grados de Apertura ).

Existe otra de forma de expresar las características de pérdida de carga de una válvula, y es usando la función  $\tau$ , donde  $\tau$  se define como

$$t = \sqrt{\frac{K_{L0}}{K_L}} \quad (102)$$

donde  $K_{L0}$  es el coeficiente de pérdida cuando la válvula esta completamente abierta. Este coeficiente de pérdida adimensional, tiene la ventaja de variar entre 0 y 1.0 y es preferido por algunos ingenieros. Debido a que la data de pérdidas de carga de la válvula puede describirse de una u otra forma, y además, es fácil convertir de una forma a otra, este trabajo usará la forma más común,  $K_L$ .

En el presente trabajo, el tiempo de cierre de la válvula generadora de transitorios, la cual consta de una válvula de bola, de acero de 1"  $\varnothing$ , montada en un mecanismo de cierre rápido, accionado por resorte (véase figura 29), se midió en el laboratorio, y los resultados están en la siguiente tabla 4:

N° DEL ENSAYO	TIEMPO, SEG.
1	0,12
2	0,13
3	0,12

TABLA 4. Tiempos Cierre de la Válvula de Bola

De donde se puede tomar un tiempo de cierre promedio igual a:  $t_c = 0,1233$  seg.

Por lo que la rapidez de cierre  $\omega$  será:  $\omega = 90^\circ/t_c$ , que se supondrá como constante.

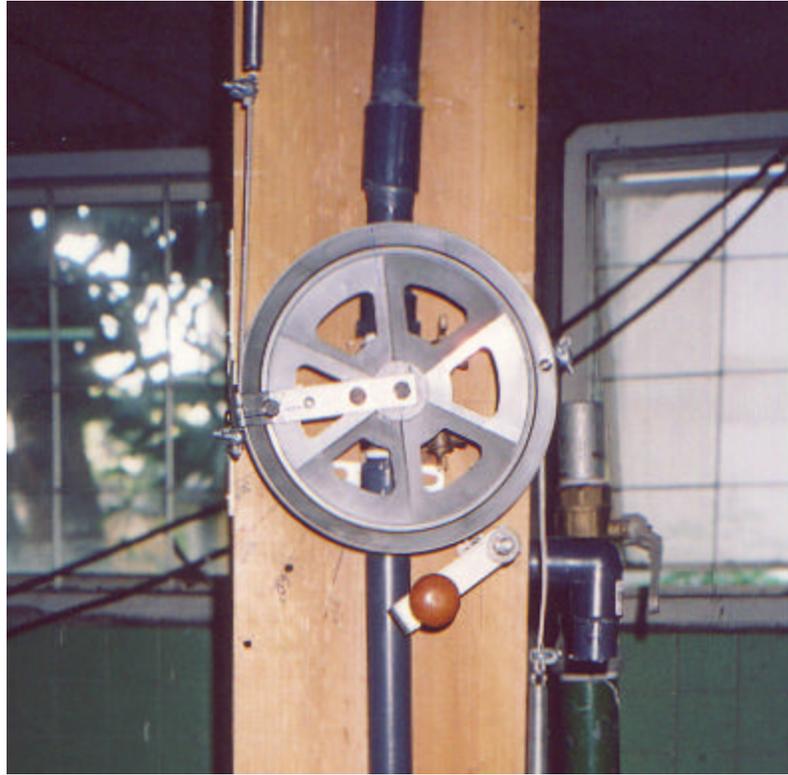


FIGURA 29. Válvula Generadora de Transitorios

Este mecanismo de cierre, que se puede apreciar en la página siguiente, fue diseñado en AUTOCAD 2000 y construido en el laboratorio por el autor del presente trabajo. Su construcción obedeció a la necesidad reproducir de una manera uniforme el cierre de la válvula. El ángulo de abertura  $\alpha$  de la válvula (vista de planta, el ángulo que forma el eje longitudinal de la perforación de la bola, con el eje transversal de la válvula que pasa por el centro de giro de su bola, véase plano en la figura 30), puede ser determinado mediante:

$$a = 90^\circ - w.t = 90^\circ \left( 1 - \frac{t}{t_c} \right)$$

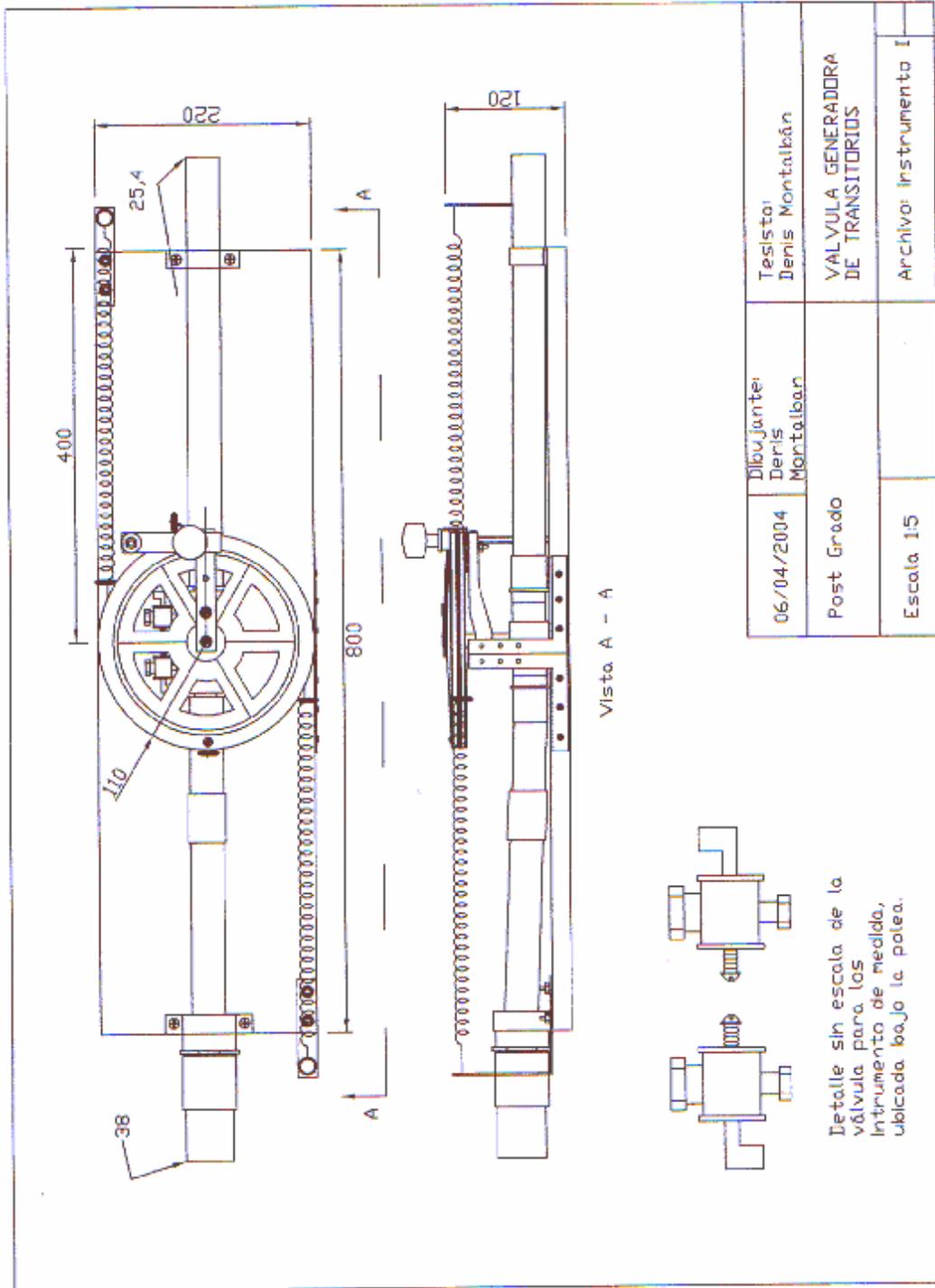


FIGURA 30. VÁLVULA GENERADORA DE TRANSITORIOS

donde  $t$  es el tiempo de evolución del transitorio desde que comienza el cierre de válvula, comprendido entre  $0 \leq t \leq t_c$ .

Esta válvula entrega todo o ningún caudal entre  $90^\circ$  y  $0^\circ$  de ángulo de apertura, respectivamente. La misma fue ensayada en laboratorio para determinar la correlación  $(1 / K_L)$  vs.  $\alpha$ , obteniéndose los siguientes resultados, tabla 5:

a (grados)	P1 (psia.)	P2 (psia.)	Q (pie3/seg)	KL experimental	1/KL experimental
90	26.85	26.8	0.05717	0.107144194	9.33321686
75	26.91	26.34	0.0566	1.246169209	0.80245924
60	27.64	23.63	0.05244	10.21301641	0.09791427
45	30.24	18.11	0.04103	50.46529193	0.01981560
30	34.23	12.02	0.0197	400.821611	0.00249488
15	37.23	13.06	0.00063	426511.332	0.00000234
0	-----	-----	0	$+\infty$	0

TABLA 5. Resultados del Ensayo de la Válvula de Bola

Para un ángulo de abertura  $\alpha$  prefijado, se midió la presión colocando el transductor en cada una de las dos tomas de presión, ubicadas justamente en la entrada y salida de la válvula (véase plano en figura 30). Al mismo tiempo, para la misma abertura  $\alpha$ , se midió el caudal que pasa a través de la válvula en posición horizontal, usando un medidor ultrasónico de caudal. Luego se determinó  $K_L$  mediante:

$$K_L = \frac{2g (P_1 - P_2)}{V^2 \mathbf{g}} = \frac{\mathbf{p}^2 D^4 2g (P_1 - P_2)}{16Q^2 \mathbf{g}}$$

y finalmente, se calculó  $(1 / K_L)$  que aparece en la tabla 5 anterior.

## 4. RESULTADOS

### 4.7 RESULTADOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN ESTABLE

Después de correr el programa de régimen estable Newtonra.f90 con la data de la Red #1, se obtuvieron los resultados contenidos en la tabla 6. El Archivo de lectura Newtonra.dat, para este programa se puede ver en la tabla 7; mientras que el Archivo Newtonra.res de interfase entre el programa estable Newtonra.f90 y el transitorio Transnet.f90, se puede observar en la tabla 8.

TABLA 6. ARCHIVO DE RESULTADOS "NEWTONRA.OUT" DEL PROGRAMA PARA RÉGIMEN ESTABLE

\*\*\*\*\*  
 \* DATA DE ENTRADA DE LA RED \*  
 \*\*\*\*\*

NUMERO DE TUBOS = 14  
 NUMERO DE NODOS = 12  
 NUMERO DE LOOPS = 4  
 NUMERO DE BOMBAS = 0  
 No.DE PSEUDO LOOPS = 1  
 ITERACIONES MAX.= 25  
 PRECISIÓN DE LA ITERACIÓN = 0.0001 PCS

\*\* DATOS DEL TUBO \*\*

TUBO	DIAM-in.	LONG-pié	Qi-PCS	f Fricción	NODO ARRIBA	NODO ABAJO	SUMKACC
1	1.658	12.30	0.0754	0.0187	2	1	19.37
2	1.658	6.62	0.0394	0.0218	3	2	5.58
3	1.121	12.33	0.0394	0.0200	4	3	3.50
4	1.121	26.24	0.0204	0.0235	5	4	0.29
5	1.121	19.78	0.0106	0.0271	6	5	69.64
6	1.121	20.30	0.0360	0.0206	6	7	12.28
7	1.658	74.77	0.0360	0.0226	7	2	4.12
8	1.121	29.46	0.0190	0.0233	8	4	0.47
9	1.121	26.34	0.0190	0.0233	9	8	2.27
10	1.121	19.78	0.0288	0.0213	10	9	15.90
11	1.121	29.59	0.0098	0.0271	9	5	26.09
12	1.121	29.65	0.0466	0.0194	10	6	0.17
13	1.121	16.27	0.0754	0.0172	11	10	4.67
14	7.981	124.53	0.0754	0.0275	12	11	248.04

\*\* TUBOS EN LOS LOOPS \*\*

LOOP	TUBOS								
1	14	13	12	5	4	3	2	1	
2	-2	-3	-4	-5	6	7			
3	-9	11	4	-8					
4	-10	12	5	-11					

\*\* INFORMACIÓN DEL PSEUDO LOOP \*\*

LOOP	DIFF.EN ELEV.TANQUE-pié
1	38.19

TABLA 6. ARCHIVO DE RESULTADOS "NEWTONRA.OUT" DEL PROGRAMA PARA RÉGIMEN ESTABLE (Continuación...)

\*\*\*\*\*  
 \* RESULTADOS DEL ANALISIS DE LA RED \*  
 \*\*\*\*\*

No. DE ITERACIONES = 2

TUBO	DIAM-in.	L-pié	f	Qi-PCS	hf-pié	H UP-pié	H DN-pié	SUMKACC
1	1.658	12.30	0.0187	0.0785	8.961	14.80	5.84	19.37
2	1.658	6.62	0.0218	0.0424	0.824	15.62	14.80	5.58
3	1.121	12.33	0.0200	0.0424	3.649	19.27	15.62	3.50
4	1.121	26.24	0.0235	0.0218	1.078	20.35	19.27	0.29
5	1.121	19.78	0.0271	0.0112	3.146	23.50	20.35	69.64
6	1.121	20.30	0.0206	0.0361	7.225	23.50	16.27	12.28
7	1.658	74.77	0.0226	0.0361	1.471	16.27	14.80	4.12
8	1.121	29.46	0.0233	0.0207	1.102	20.37	19.27	0.47
9	1.121	26.34	0.0233	0.0207	1.246	21.62	20.37	2.27
10	1.121	19.78	0.0213	0.0312	6.559	28.18	21.62	15.90
11	1.121	29.59	0.0271	0.0105	1.270	21.62	20.35	26.09
12	1.121	29.65	0.0194	0.0473	4.684	28.18	23.50	0.17
13	1.121	16.27	0.0172	0.0785	15.646	43.83	28.18	4.67
14	7.981	124.53	0.0275	0.0785	0.201	44.03	43.83	248.04

NODO	H piezom.-pié	Cota-pié	P-psig.	SUM Q-PCS
1	5.84	5.84	0.00	0.0785
2	14.80	7.94	2.97	0.0000
3	15.62	10.20	2.35	0.0000
4	19.27	10.20	3.93	0.0000
5	20.35	10.20	4.39	0.0000
6	23.50	10.20	5.75	0.0000
7	16.27	0.10	7.00	0.0000
8	20.37	10.20	4.40	0.0000
9	21.62	10.20	4.94	0.0000
10	28.18	10.20	7.78	0.0000
11	43.83	11.38	14.04	0.0000
12	44.03	42.98	0.45	-0.0785

LOOP	SUMA DE PERDIDAS DE CARGA-pié
1	38.1881
2	0.0000
3	0.0000
4	-0.0001

LA DATA PARA ANALISIS TRANSITORIO HA SIDO ESCRITA EN EL ARCHIVO "NEWTONRA.RES"

TABLA 7. Archivo de Datos "Newtonra.dat" para el Programa de Régimen Estable "Newtonra.f90"

```

14 4 25 0 1 0.0001 F T 12 12 44.027 52
1 1.658 12.30 0.01870529 0.0754 19.3722414 2 1 1531.16
2 1.658 6.62 0.02183874 0.0394 5.58363144 3 2 1531.16
3 1.121 12.33 0.01998999 0.0394 3.49680773 4 3 1698.49
4 1.121 26.24 0.02345909 0.0204 0.29436576 5 4 1698.49
5 1.121 19.78 0.02705538 0.0106 69.6425636 6 5 1698.49
6 1.121 20.30 0.02063504 0.0360 12.2785068 6 7 1698.49
7 1.658 74.77 0.02257612 0.0360 4.11771367 7 2 1531.16
8 1.121 29.46 0.02329309 0.0190 0.47370159 8 4 1698.49
9 1.121 26.34 0.02329309 0.0190 2.27036762 9 8 1698.49
10 1.121 19.78 0.02129629 0.0288 15.9021001 10 9 1698.49
11 1.121 29.59 0.02711789 0.0098 26.0877747 9 5 1698.49
12 1.121 29.65 0.01938498 0.0466 0.16816402 10 6 1698.49
13 1.121 16.27 0.01723273 0.0754 4.67468489 11 10 1698.49
14 7.981 124.53 0.02753122 0.0754 248.041502 12 11 4366.14
1 5.839
2 7.939
3 10.203
4 10.203
5 10.203
6 10.203
7 0.098
8 10.203
9 10.203
10 10.203
11 11.384
12 42.978
1 8 14 13 12 5 4 3 2 1
2 6 -2 -3 -4 -5 6 7
3 4 -9 11 4 -8
4 4 -10 12 5 -11
1 38.188

```

TABLA 8. Archivo de Interfase "Newtonra.res" entre el Programa de Régimen Estable y el Programa de Régimen Transitorio

14		0		12			
1	5.838967			5.839000			
2	14.79981			7.939000			
3	15.62376			10.20300			
4	19.27240			10.20300			
5	20.35028			10.20300			
6	23.49613			10.20300			
7	16.27110			9.7999997E-02			
8	20.37477			10.20300			
9	21.62074			10.20300			
10	28.17994			10.20300			
11	43.82613			11.38400			
12	44.02700			42.97800			
1	1.658000			12.30000	1.8705290E-02	7.8521587E-02	
2		1	1531.160		19.37224		
2	1.658000		6.620000		2.1838740E-02	4.2413704E-02	
3		2	1531.160		5.583632		
3	1.121000		12.33000		1.9989990E-02	4.2413704E-02	
4		3	1698.490		3.496808		
4	1.121000		26.24000		2.3459090E-02	2.1763254E-02	
5		4	1698.490		0.2943658		
5	1.121000		19.78000		2.7055381E-02	1.1236106E-02	
6		5	1698.490		69.64256		
6	1.121000		20.30000		2.0635040E-02	3.6107883E-02	
6		7	1698.490		12.27851		
7	1.658000		74.77000		2.2576120E-02	3.6107883E-02	
7		2	1531.160		4.117713		
8	1.121000		29.46000		2.3293089E-02	2.0650450E-02	
8		4	1698.490		0.4737016		
9	1.121000		26.34000		2.3293089E-02	2.0650450E-02	
9		8	1698.490		2.270368		
10	1.121000		19.78000		2.1296291E-02	3.1177599E-02	
10		9	1698.490		15.90210		
11	1.121000		29.59000		2.7117889E-02	1.0527149E-02	
9		5	1698.490		26.08777		
12	1.121000		29.65000		1.9384980E-02	4.7343988E-02	
10		6	1698.490		0.1681640		
13	1.121000		16.27000		1.7232729E-02	7.8521587E-02	
11		10	1698.490		4.674685		
14	7.981000		124.5300		2.7531220E-02	7.8521587E-02	
12		11	4366.140		248.0415		
-1		0	0		0		
1		-2	-7		0		
2		-3	0		0		
3		-4	-8		0		
4		-5	-11		0		
5		6	-12		0		
-6		7	0		0		
8		-9	0		0		
9		-10	11		0		
10		12	-13		0		
13		-14	0		0		
14		0	0		0		

#### 4.8 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA RÉGIMEN ESTABLE

El resultado de las mediciones en régimen estable se puede apreciar en las Tablas 9 y 10. La Tabla 11 contiene la descripción completa del estado operacional de la Red N° 1, en régimen estable. Algunos símbolos utilizados en dicha tabla son:

UP: Extremo aguas arriba del tubo.

DN: Extremo aguas abajo del tubo.

h piez.: Altura piezométrica.

hf: Pérdida de carga total en la tubería, igual a (h piez.up – h piez.dn)

k: Rugosidad absoluta.

k/d: Rugosidad Relativa

f Swamnee: Factor de fricción calculado por 
$$f = \frac{0,25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{k/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

H<sub>r<sub>p</sub></sub>: Pérdidas de carga por fricción en tuberías, determinada por la ec. de Darcy

H<sub>r<sub>s</sub></sub>: Pérdidas de carga por fricción en accesorios, igual a (hf – H<sub>r<sub>p</sub></sub>)

SUMA K<sub>i</sub>: igual a H<sub>r<sub>s</sub></sub> / (V<sup>2</sup>/2g)

B1 y B2: Son los parámetros de la ecuación de Churchill para el cálculo de f.

f Churchill: Factor de fricción f calculado por la ecuación de Churchill, de la

sección 2.3. Esta formula fue usada para estimar f<sub>cuasi-estable</sub>.

TUBO #	NODO AGUAS		CAUDAL,pié <sup>3</sup> /seg.
	ARRIBA	ABAJO	
1	2	1	0,0801
2	3	2	0,0399
3	4	3	0,0399
4	5	4	0,0199
5	6	5	0,0112
6	6	7	0,0346
7	7	2	0,0346
8	8	4	0,0205
9	9	8	0,0205
10	10	9	0,0301
11	9	5	0,0111
12	10	6	0,0459
13	11	10	0,0801
14	12	11	0,0801

TABLA 9. Caudales Medidos en Régimen Estable

<b>NODO #</b>	<b>COTA, Pié.</b>	<b>PRESIÓN, psia.</b>
1	5,839	14,65
2	7,939	17,83
3	10,203	16,99
4	10,203	18,90
5	10,203	19,11
6	10,203	20,20
7	0,0980	21,51
8	10,203	19,21
9	10,203	19,42
10	10,203	22,31
11	11,384	29,03
12	42,978	Sin medición

TABLA 10. Presiones Nodales Medidas en Régimen Estable

TABLA 11. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO OPERACIONAL DE LA RED N° 1 EN RÉGIMEN ESTABLE

Tubo #	Nodo up.	Nodo dn.	Cota up.(pié)	Cota dn.(pié)	h piez.up(pié)	h piez.dn(pié)	hf (pié)	Diámetro(pulg)	Long. (pié)	Q (pié <sup>3</sup> /seg)
1	2	1	7.939	5.839	15.162	5.839	9.323	1.658	12.3	0.0801
2	3	2	10.203	7.939	15.891	15.162	0.729	1.658	6.62	0.0399
3	4	3	10.203	10.203	19.1186	15.891	3.2276	1.121	12.33	0.0399
4	5	4	10.203	10.203	20.019	19.1186	0.9004	1.121	26.24	0.0199
5	6	5	10.203	10.203	23.144	20.019	3.125	1.121	19.78	0.0112
6	6	7	10.203	0.098	23.144	16.512	6.632	1.121	20.3	0.0346
7	7	2	0.098	7.939	16.512	15.162	1.35	1.658	74.77	0.0346
8	8	4	10.203	10.203	20.204	19.1186	1.0854	1.121	29.46	0.0205
9	9	8	10.203	10.203	21.431	20.204	1.227	1.121	26.34	0.0205
10	10	9	10.203	10.203	27.5428	21.431	6.1118	1.121	19.78	0.0301
11	9	5	10.203	10.203	21.431	20.019	1.412	1.121	29.59	0.0111
12	10	6	10.203	10.203	27.5428	23.144	4.3988	1.121	29.65	0.0459
13	11	10	11.384	10.203	43.818	27.5428	16.2752	1.121	16.27	0.0801
14	12	11	42.978	11.384	44.027	43.818	0.209	7.981	124.53	0.0801

TABLA 11. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO OPERACIONAL DE LA RED N° 1 EN RÉGIMEN ESTABLE (continuación ...)

TUBO #	N° Reynolds	k (pié)	k/D	"f" Swamnee	V <sup>2</sup> /2g (pié)	Hrp (pié)	Hrs (pié)	SUMA "Ki"	B1 + B2	f Churchill
1	80671.1691	0	0	0.018692101	0.443187002	0.737474418	8.585525582	19.37224137	1.11945E+21	0.018705298
2	40184.5149	0	0	0.021821728	0.109968367	0.114977171	0.614022829	5.583631444	3.24264E+20	0.021838747
3	59434.3673	0	0	0.019975268	0.526239482	1.387441709	1.840158291	3.496807735	6.5799E+20	0.01998999
4	29642.7045	0	0	0.023439971	0.130901249	0.861867155	0.038532845	0.294365758	1.82907E+20	0.023459099
5	16683.3312	0	0	0.027031269	0.041464237	0.237324209	2.887675791	69.64256356	5.84374E+19	0.02705538
6	51539.5767	0	0	0.02061953	0.395721672	1.773128752	4.858871248	12.27850683	5.10361E+20	0.02063504
7	34846.7222	0	0	0.022558156	0.082694034	1.009489644	0.340510356	4.117713673	2.48614E+20	0.022576123
8	30536.4544	0	0	0.023274187	0.13891379	1.019596317	0.065803683	0.473701591	1.93599E+20	0.023293095
9	30536.4544	0	0	0.023274187	0.13891379	0.911614629	0.315385371	2.270367623	1.93599E+20	0.023293095
10	44836.4525	0	0	0.021279961	0.299481934	1.349408316	4.762391684	15.90210009	3.96541E+20	0.021296294
11	16534.3729	0	0	0.027093695	0.04072711	0.349520326	1.062479674	26.08777473	5.73683E+19	0.027117897
12	68371.8662	0	0	0.01937099	0.696406809	4.281689428	0.117110572	0.168164025	8.41387E+20	0.019384987
13	119315.61	0	0	0.017221211	2.120814429	6.361060838	9.914139162	4.674684887	2.15718E+21	0.017232735
14	16758.9022	0.00015	0.000225536	0.027508849	0.00082546	0.004251735	0.204748265	248.0415022	5.08294E+19	0.027531227

#### 4.9 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO

En las siguientes secciones se intenta averiguar cuan sensible es el modelo respecto a la variación de la celeridad de la onda  $a_i$ , del coeficiente de pérdida da carga  $\Sigma K_i$  y del factor de fricción  $f_i$ .

Las constantes A, B y C en las Tablas 12, 13, 14 y 15, son factores que en el código fuente, modifican las propiedades  $f_i$ ,  $\Sigma K_i$  y  $a_i$  en cada tubería, de la siguiente forma:

$$f_i \text{ modelo transitorio} = A * f_i \text{ régimen estable}$$

$$\Sigma K_i \text{ modelo t ransitorio} = B * \Sigma K_i \text{ régimen estable}$$

$$a_i \text{ mod elo} = C * a_i \text{ teórica}$$

*transitorio*

Donde  $f_i$ ,  $\Sigma K_i$  y  $a_i$  son el factor de fricción; la suma de los coeficientes de pérdida de carga de los accesorios y la celeridad de la onda para cada tubería, respectivamente.

##### 4.3.1 SENSIBILIDAD RESPECTO A LA VELOCIDAD DE LA ONDA $a_i$

La velocidad teórica de la onda  $a_i$  para los tres tipos de tubería, se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$a_i = \sqrt{\frac{E/\rho}{1 + \frac{EDC}{E_c e}}}$$

donde:

E: Módulo de elasticidad volumétrico del líquido ( $22320 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$  para el agua)

$\rho$ : densidad del líquido ( $101,8 \text{ Kg.seg}^2 / \text{m}^4$  para el agua)

$E_c$ : Módulo de elasticidad del material ( $28127,97 \times 10^4 \text{ Kg} / \text{m}^2$  para el PVC y

$2109597,75 \times 10^4 \text{ Kg} / \text{m}^2$  para el acero)

D: Diámetro, m.

e: Espesor de la tubería, m.

$\mu$ : Relación de poisson (0,45 para la tubería PVC y 0,30 para la tubería de acero)

C: Factor de colocación de la tubería, igual  $1 - \mu^2$  (0,7975 para la tubería de PVC y

0,91 para la tubería de acero)

Estas velocidades de onda  $a_i$  que son usadas en el modelo teórico, se resumen en el siguiente cuadro:

$f_{\text{nominal}}$ (pulg)	$f_{\text{externo}}$ (m.)	$f_{\text{interno}}$ (m.)	e (m.)	Material	$a_i$ (m/seg.)	$a_i$ (pie/seg.)
1	0,0335	0,02848	0,00251	PVC	517,70	1698,49
1½	0,048	0,04212	0,00294	PVC	466,70	1531,16
8	0,2191	0,2027	0,0082	Acero	1330,80	4366,14

Debido a que la velocidad de la onda en el modelo teórico, puede diferir de la velocidad real de la onda en el modelo experimental, es necesario ajustar la velocidad teórica de la onda para cada tubo, con un factor C, obtenido de un estudio de sensibilidad, y que debería estar muy cerca de la unidad, a fin corregir esta natural desviación. De forma tal que:

$$a_{i \text{ modelo transitorio}} = C a_{i \text{ teórica}}$$

Esto se hizo graficando las ondas generadas por el modelo en el nodo 5 (seleccionado como nodo de calibración), cuando este es corrido para diferentes valores de C, y comparándolas con la onda de presión medida. Los resultados del estudio, guiado por la información contenida en la Tabla 12, se pueden apreciar en la figura 31.a (con resultados finales descritos en la figura 31.b)

En la Figura 31.b se puede observar que cuando  $C = 0,828567$ , la frecuencia de la onda de presión en el modelo, se aproxima bien a la frecuencia de la onda medida. Por lo que se adoptó este valor para modelar la velocidad de la onda.

<b>CORRIDA #</b>	<b>VALOR DE “A”</b>	<b>VALOR DE “B”</b>	<b>VALOR DE “C”</b>
1	1	1	1
2	1	1	0,9
3	1	1	0,828567

TABLA 12. Variación del Factor C que Modifica a  $a_i$

FIGURA 31.a Presión vs. Tiempo (Teor.y Med.en N5;dt=0,004;Factor\*A(I);1,0\*F(I);1,0\*Sumkacc(I);T4-S1;Prueba Gráfica.xls)

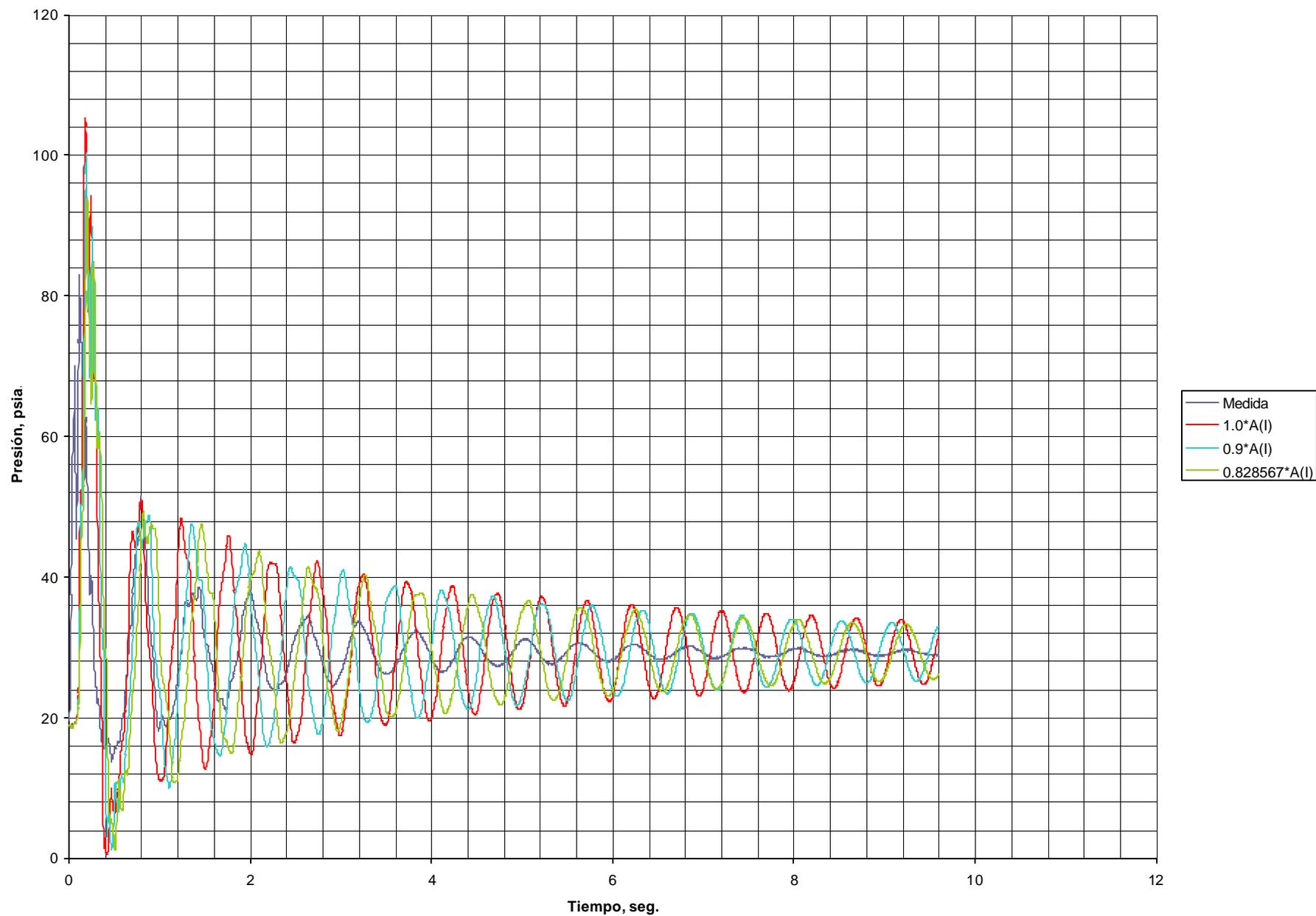
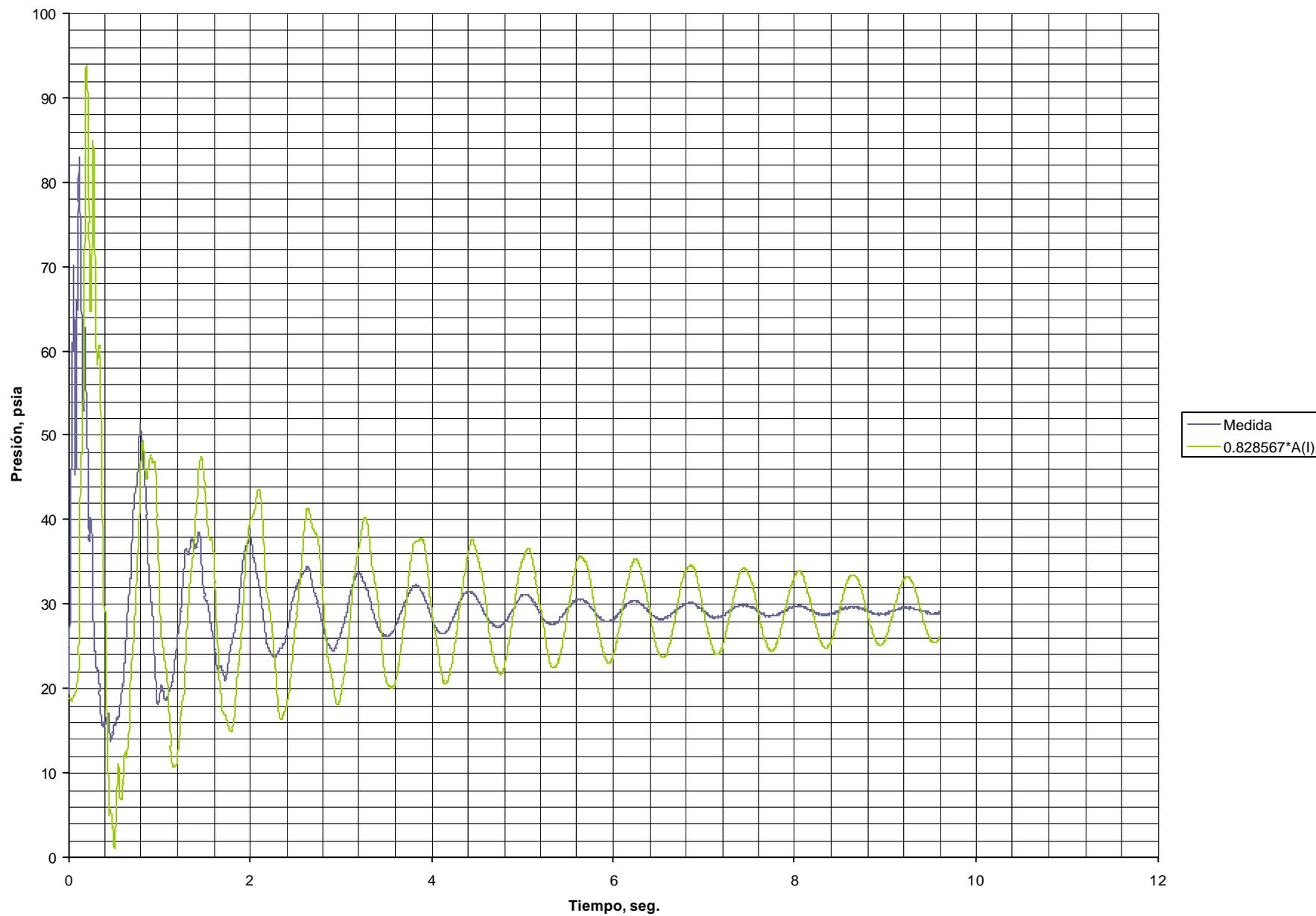


FIGURA 31.b Presión vs. Tiempo (Teor.y Med.en N5;dt=0,004;Factor\*A(I);1,0\*F(I);1,0\*Sumkacc(I);T4-S1;Prueba Gráfica.xls)



#### 4.3.3 SENSIBILIDAD RESPECTO AL FACTOR DE FRICCIÓN $f_i$ Y AL COEFICIENTE DE PÉRDIDA DE CARGA $\Sigma K_i$

Investigadores como Zielke, W. (1968) y Brunone, B.(1991), han propuesto en sus modelos de fricción transitoria, que el factor de fricción cuasi-estacionaria  $f_q$  debe ser incrementado en una cantidad  $f_{ti}$ , denominada factor de fricción inestable (sobre la cual hay mucha divergencia en los investigadores en la forma de calcularla), para obtener una mejor representación del factor de fricción a usar en el modelo transitorio descrito por las ecuaciones (39) y (40). Esto indica que el factor de fricción en el modelo transitorio debe ser mayor que la fricción cuasi-estacionaria. Bergant, Simpson y Vitkovsky (2001), también han confirmado el hecho que la fricción medida experimentalmente, es superior a la fricción cuasi-estacionaria.

Dentro de los objetivos del presente trabajo no está planteado usar modelos transitorios para expresar la fricción, sino adoptar la hipótesis cuasi-estacionaria, es decir, estimar la fricción transitoria como se hace en régimen estable, actualizando el número de Reynolds y las alturas de velocidad, con la velocidad instantánea  $V_i$ . Luego, ajustar tanto el factor de fricción  $f_{qi}$  de la hipótesis cuasi-estacionaria como el coeficiente de pérdidas de carga por accesorios  $\Sigma K_i$ , a las condiciones de régimen transitorio.

De la observación de la Figura 31.b, se puede evidenciar que en la onda de presión medida en el nodo de calibración (nodo 5), los efectos de la fricción son mucho más

acentuados que en la onda de presión generada por el modelo en el mismo nodo, manteniendo  $f_i$  y  $\Sigma K_i$  del régimen estable (corrida #3, hipótesis cuasi-estacionaria). Esto quiere decir que los  $f_i$  y  $\Sigma K_i$  del régimen estable usados en esta corrida, no representan la fricción transitoria, por lo que es necesario ajustarlos mediante un factor, que se puede determinar a través un estudio de sensibilidad del modelo respecto  $f_i$  y  $\Sigma K_i$ . Este estudio se hizo guiado por la información contenida en las tablas 13, 14 y 15, y sus resultados se pueden apreciar en las figuras 32.a , 33.a y 34.a (con resultados finales descritos en las figuras 32.b , 33.b y 34.b).

<b>CORRIDA #</b>	<b>VALOR DE “A”</b>	<b>VALOR DE “B”</b>	<b>VALOR DE “C”</b>
4	1	1	0,828567
5	1	1,5	0,828567
6	1	2,0	0,828567
7	1	2,4	0,828567

TABLA 13. Variación del Factor B que Modifica a  $\Sigma K_i$

<b>CORRIDA #</b>	<b>VALOR DE “A”</b>	<b>VALOR DE “B”</b>	<b>VALOR DE “C”</b>
8	1	1	0,828567
9	2	1	0,828567
10	3,2	1	0,828567

TABLA 14. Variación del Factor A que Modifica a  $f_i$

<b>CORRIDA #</b>	<b>VALOR DE “A”</b>	<b>VALOR DE “B”</b>	<b>VALOR DE “C”</b>
11	1	1	0,828567
12	1,5	1,5	0,828567
13	2	2	0,828567

TABLA 15. Variación de los Factores A y B que Modifican en igual proporción a  $\Sigma K_i$  y  $f_i$  Simultáneamente.

Debido a que el factor de fricción  $f$  se incrementa al pasar de la hipótesis cuasi-estacionaria a régimen propiamente transitorio, cabe esperar que algo similar ocurra con el coeficiente de pérdida de carga  $\Sigma K_i$ . De la figura 34.a se puede observar la respuesta del modelo al incremento igualmente proporcional y simultáneo tanto de  $f_i$  como de  $\Sigma K_i$ . En la figura 34.b se evidencia que cuando tanto el factor A como el factor B en la tabla 15, son iguales a 2, tanto el pico como la frecuencia de la onda generada por el modelo transitorio, producen su mejor aproximación a la onda medida.

Por lo antes expuesto, se adoptarán los factores  $A = 2$ ,  $B = 2$  y  $C = 0,828567$  de la tabla 15, para correr el modelo y graficar las curvas Presión vs. Tiempo en cada uno de los nodos de prueba (nodos 9, 3, 1, 6, 5 y 4). Estas curvas se muestran en las figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40 de la sección 4.5.

FIGURA 32.a Presión vs. Tiempo (teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);1,0\*F(I);Factor\*Sumkacc(I);T4-S1;Prueba Gráfica.xls)

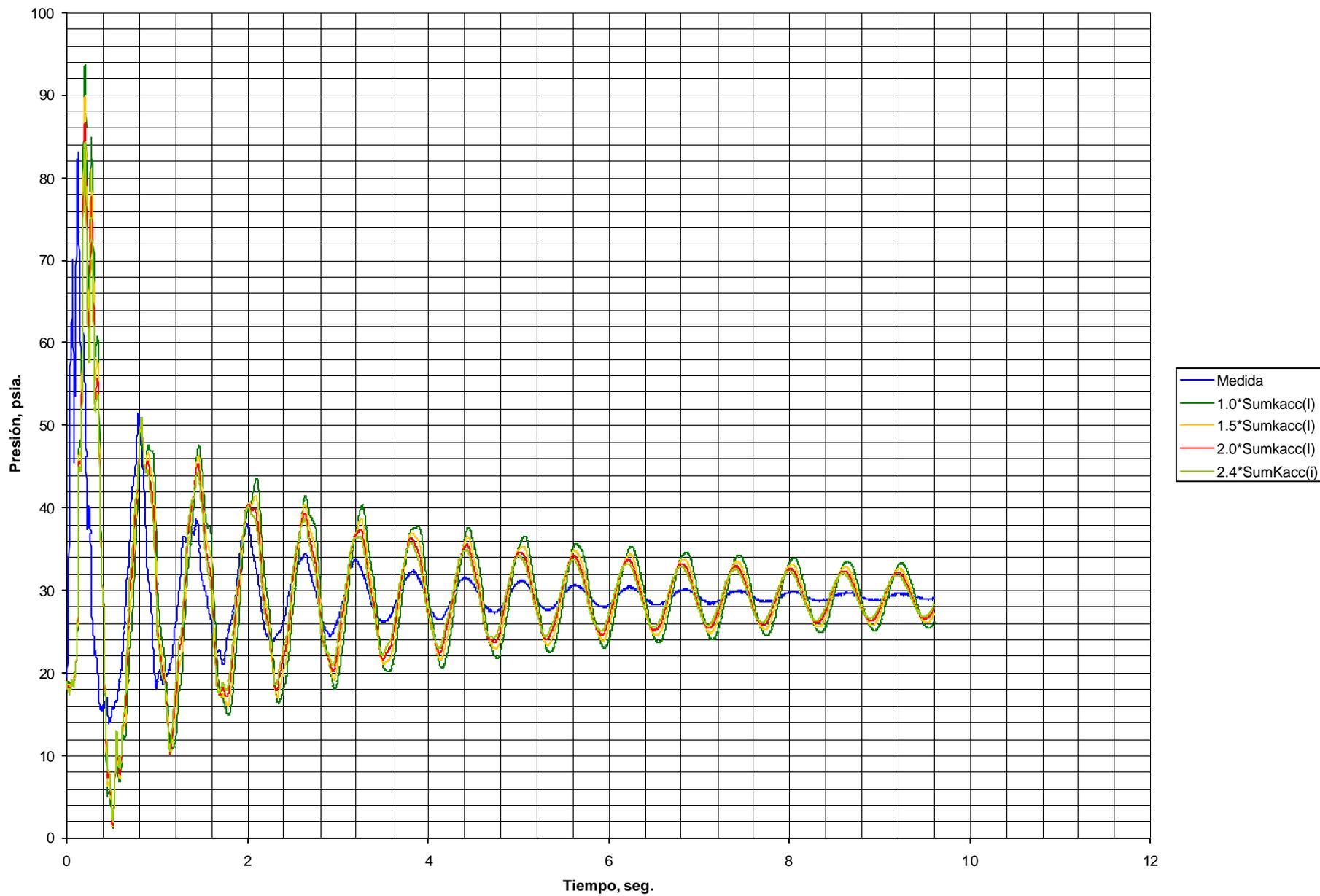


FIGURA 32.b Presión vs. Tiempo (teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);1,0\*F(I);Factor\*Sumkacc(I);T4-S1;P.Gráfica.xls)

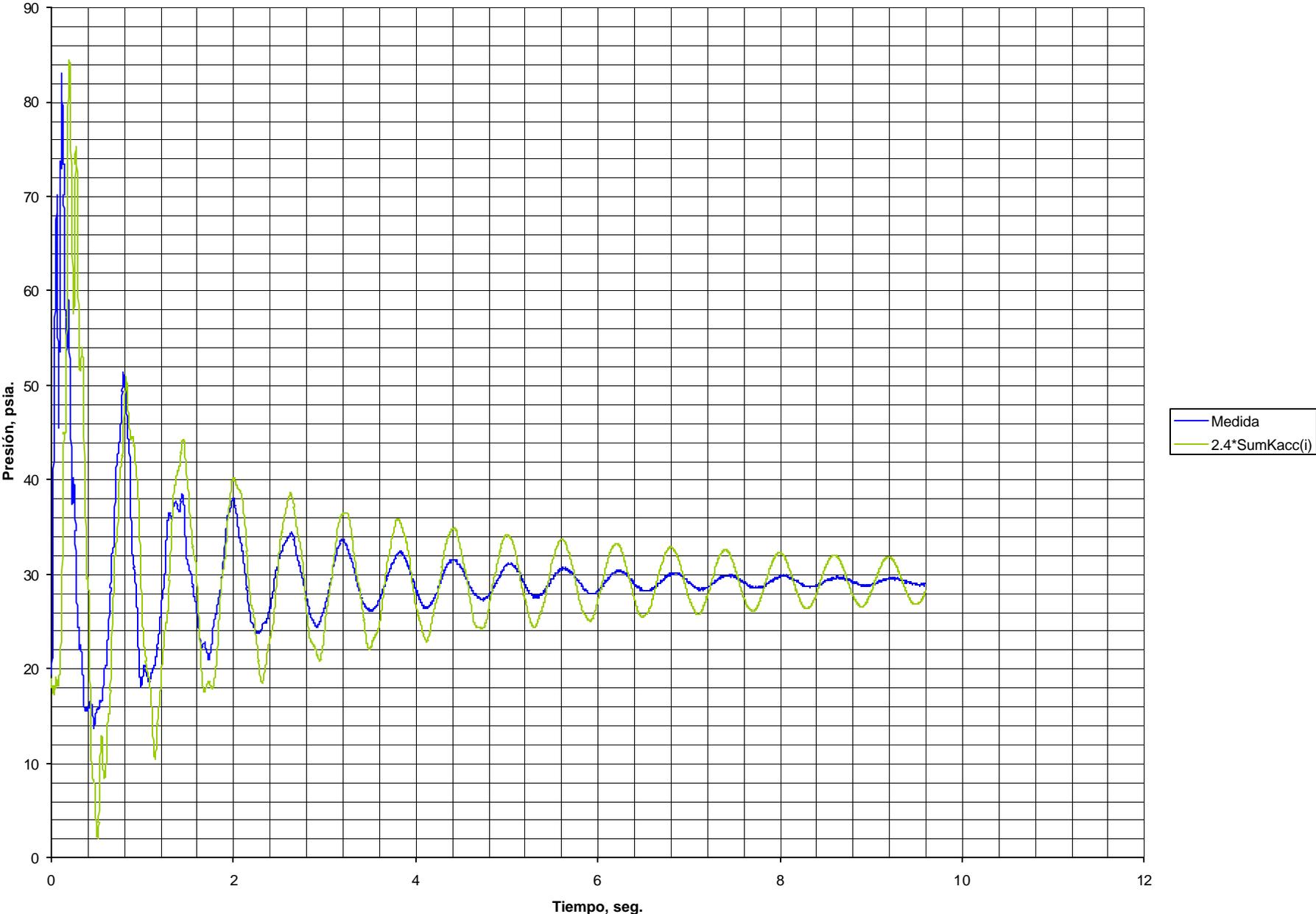


FIGURA 33.a Presión vs. Tiempo (Teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);Factor\*F(I);1,0\*Sumkacc(I);T4-S1;P.Gráfica.xls)

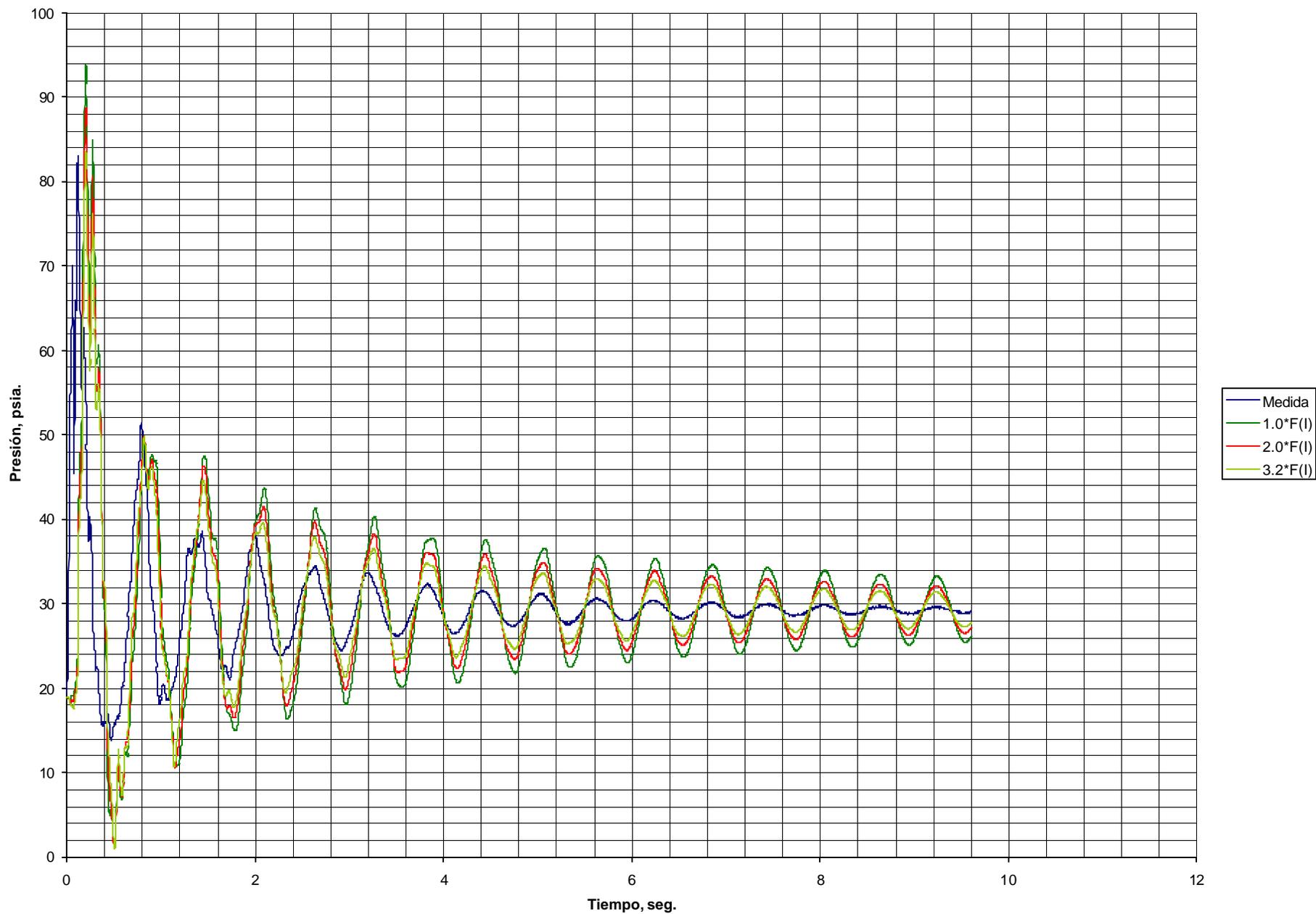


FIGURA 33.b Presión vs. Tiempo (Teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);Factor\*F(I);1,0\*Sumkacc(I);T4-S1;P.Gráfica.xls)

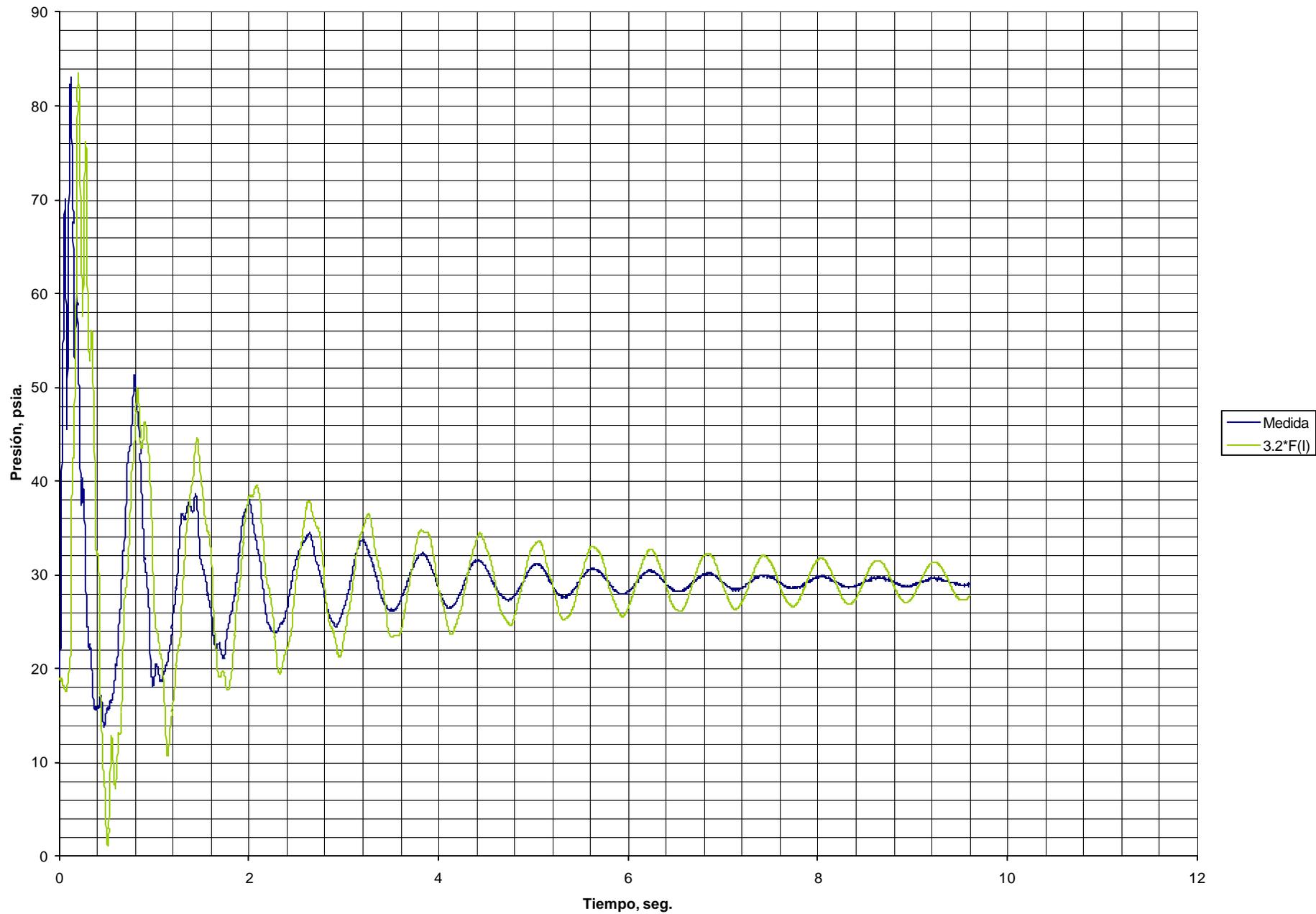


FIGURA 34.a Presión vs.Tiempo(Teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);Factor\*F(I);Factor\*Sumkacc(I);T4-S1;P.Gráfica.xls)

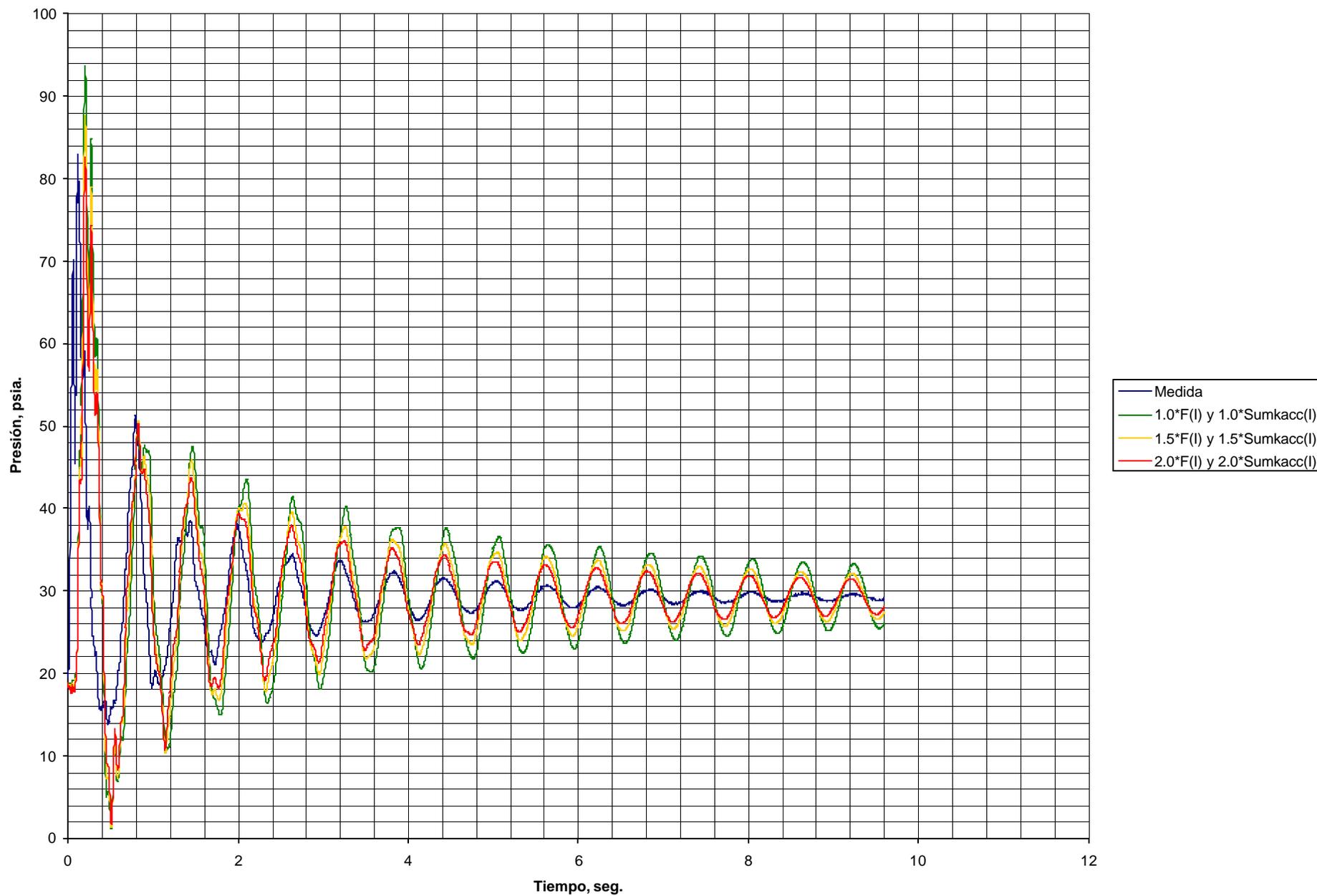
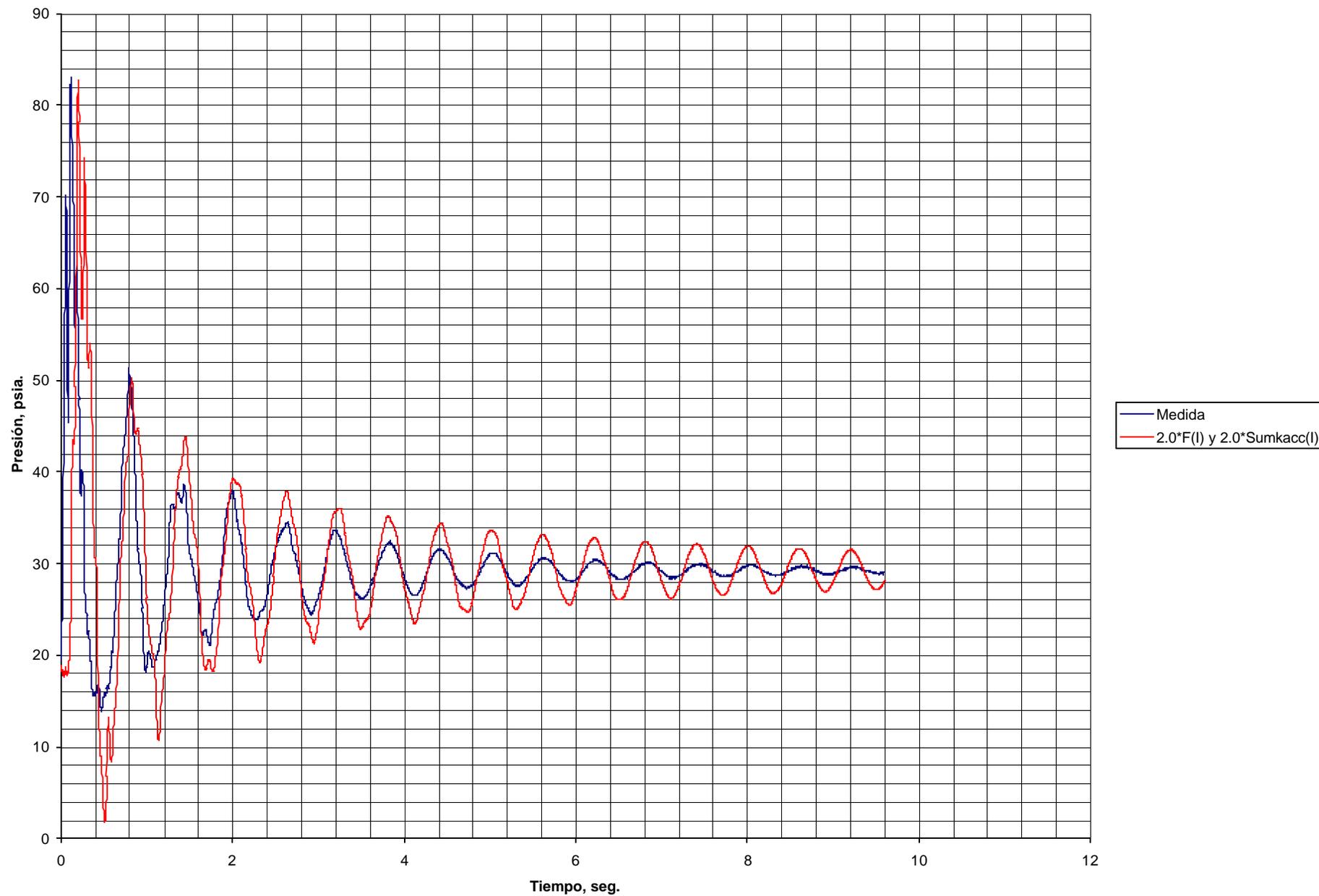


FIGURA 34.b Presión vs.Tiempo(Teor.y Med.en N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);Factor\*F(I);Factor\*Sumkacc(I);T4-S1;P.Gráfica.xls)



#### 4.10 RESULTADOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN TRANSITORIO

El archivo de lectura de datos Transnet.dat para el programa de régimen transitorio Transnet.f90, se puede ver en la tabla 17.

El archivo de resultados, después de haber corrido el programa Transnet.f90 con la data de la Red #1, se denomina Transnet.out y está contenido en la tabla 18.

TABLA 17. Archivo de Datos "Transnet.Dat" para el Programa de Régimen Transitorio

```

&SPECS
NPARTS=1
HATM=33.91
HVAPOR=-32.74
TMAX=12.
IOUT=200
NODOUT=T
PVALVE=1
TC1=0.06165
TC2=0.1233
PC1=45.0
KLI(1)=0.0
KLI(2)=0.00001849
KLI(3)=0.00003699
KLI(4)=0.00005548
KLI(5)=0.01105014
KLI(6)=0.01981555
KLI(7)=0.04048234
KLI(8)=0.15598311
KLI(9)=0.55440565
KLI(10)=1.56679259
KLI(11)=9.33321686
SAVEE=T
PPLOT=F
ISIZE=160
&END

&PRDATA
NSAVE=4
IOUTSA=1
ISAVE=9,2,4,14
JSAVE=1,1,1,1
ISIZE=160
JSIZE=16000
&END

```

TABLA 18. Archivo de Resultados Numéricos "Transnet.out" para el Programa de Régimen Transitorio "Transnet.f90" (véase también resultados gráficos en las figuras 35 al 40)

\*\*\*\*\*  
\* ANALISIS TRANSITORIO DE RED \*  
\*\*\*\*\*

IOUT = 200  
NPARTS = 1  
NPIPES = 14  
HATM = 33.9  
HVAPOR = -32.7  
TMAX = 12.00  
DELT = 0.00400

DATA DEL ANALISIS TRANSITORIO  
-----

LA VALVULA EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO DEL TUBO = 1 SE CERRÓ.

EL CIERRE SE EFECTUÓ EN 0.12 seg.

DATA DE ENTRADA DEL TUBO  
-----

TUBO	DIAM-pulg.	LONG-pié	V.ONDA-pié/seg.	COTA UP-pié	F	VEL-pié/seg.	DELT-seg.	PARTS	SINE	L/A-seg.	SUMKACC
1	1.66	12.30	1531.	7.94	.0187	5.24	0.00966	2	-.1707	0.0097	19.37
2	1.66	6.62	1531.	10.20	.0218	2.83	0.00521	1	-.3420	0.0052	5.58
3	1.12	12.33	1698.	10.20	.0200	6.19	0.00872	2	0.0000	0.0088	3.50
4	1.12	26.24	1698.	10.20	.0235	3.18	0.01860	4	0.0000	0.0186	0.29
5	1.12	19.78	1698.	10.20	.0271	1.64	0.01404	3	0.0000	0.0141	69.64
6	1.12	20.30	1698.	10.20	.0206	5.27	0.01437	3	-.4978	0.0144	12.28
7	1.66	74.77	1531.	0.10	.0226	2.41	0.05882	14	0.1049	0.0589	4.12
8	1.12	29.46	1698.	10.20	.0233	3.01	0.02089	5	0.0000	0.0209	0.47
9	1.12	26.34	1698.	10.20	.0233	3.01	0.01868	4	0.0000	0.0187	2.27
10	1.12	19.78	1698.	10.20	.0213	4.55	0.01401	3	0.0000	0.0141	15.90
11	1.12	29.59	1698.	10.20	.0271	1.54	0.02100	5	0.0000	0.0210	26.09
12	1.12	29.65	1698.	10.20	.0194	6.91	0.02097	5	0.0000	0.0211	0.17
13	1.12	16.27	1698.	11.38	.0172	11.46	0.01147	2	-.0726	0.0116	4.67
14	7.98	124.53	4366.	42.98	.0275	0.23	0.03442	8	-.2537	0.0344	248.04

DATA DE ENTRADA DEL NODO  
-----

NODO	H piezom-pié	COTA-pié	TUBOS CONECTADOS AL NODO				SUMA Qi-pié <sup>3</sup> /seg.
			1	2	3	4	
1	5.84	5.84	-1	0	0	0	0.0785
2	14.80	7.94	1	-2	-7	0	0.0000
3	15.62	10.20	2	-3	0	0	0.0000
4	19.27	10.20	3	-4	-8	0	0.0000
5	20.35	10.20	4	-5	-11	0	0.0000
6	23.50	10.20	5	6	-12	0	0.0000
7	16.27	0.10	-6	7	0	0	0.0000
8	20.37	10.20	8	-9	0	0	0.0000
9	21.62	10.20	9	-10	11	0	0.0000
10	28.18	10.20	10	12	-13	0	0.0000
11	43.83	11.38	13	-14	0	0	0.0000
12	44.03	42.98	14	0	0	0	-0.0785

TABLA 18. Archivo de Resultados Numéricos "Transnet.out" para el Programa de Régimen Transitorio "Transnet.f90"(continuación...)

```

*****
* TABLA DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE Hm Y H *
*****

```

	X/L	Hm max,pié	Hm min,pié	H max,pié	H min,pié
	---	-----	-----	-----	-----
TUBO # 1	0.0	193.9	-32.7	201.9	-24.8
	1.0	212.8	-32.7	218.6	-26.9
TUBO # 2	0.0	193.8	-32.7	204.0	-22.5
	1.0	193.9	-32.7	201.9	-24.8
TUBO # 3	0.0	189.2	-32.7	199.4	-22.5
	1.0	193.7	-32.7	203.9	-22.5
TUBO # 4	0.0	163.9	-30.8	174.1	-20.6
	1.0	189.2	-32.7	199.4	-22.5
TUBO # 5	0.0	179.6	-32.5	189.8	-22.3
	1.0	168.6	-30.8	178.8	-20.6
TUBO # 6	0.0	179.6	-32.5	189.8	-22.3
	1.0	194.5	-32.7	194.6	-32.6
TUBO # 7	0.0	193.1	-32.7	193.2	-32.6
	1.0	193.9	-32.7	201.9	-24.8
TUBO # 8	0.0	178.2	-32.7	188.4	-22.5
	1.0	189.2	-32.7	199.4	-22.5
TUBO # 9	0.0	143.2	-17.9	153.4	-7.7
	1.0	178.2	-32.7	188.4	-22.5
TUBO # 10	0.0	116.8	-2.6	127.0	7.6
	1.0	143.5	-20.8	153.7	-10.6
TUBO # 11	0.0	143.2	-17.9	153.4	-7.7
	1.0	163.6	-31.2	173.8	-21.0
TUBO # 12	0.0	116.8	-2.6	127.0	7.6
	1.0	179.6	-32.5	189.8	-22.3
TUBO # 13	0.0	48.5	18.5	59.9	29.9
	1.0	118.6	-2.6	128.8	7.6
TUBO # 14	0.0	1.0	1.0	44.0	44.0
	1.0	48.5	18.4	59.9	29.8

ALTURA DE PRESIÓN Hm max.= 212.8 pié EN TUBO 1 A X =1.000 EN UN TIEMPO DE 0.236 seg.

ALTURA DE PRESIÓN Hm min.= -32.7 pié EN TUBO 7 A X =0.714 EN UN TIEMPO DE 0.572 seg.

TABLA 18. Archivo de Resultados Numéricos "Transnet.out" para el Programa de Régimen Transitorio "Transnet.f90" (continuación...)

\*\*\*\*\*  
 \* PRESIÓN ABS., Hm, H Y VELOCIDAD vs. TIEMPO PARA EL NODO 9 (solo hasta 0.224 seg.) \*  
 \*\*\*\*\*

TUBO # 9 SECCION # 1 (NODO 9)

TIEMPO-seg.	PRESIÓN-psia.	H.presión-pié	H.piezom-pié	COTA-pié	VEL-pié/seg.
-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.00000	19.58	11.42	21.62	10.20	3.01
0.00400	18.77	9.55	19.75	10.20	2.97
0.00800	18.84	9.71	19.91	10.20	2.96
0.01200	18.84	9.70	19.91	10.20	2.96
0.01600	18.10	7.99	18.20	10.20	2.92
0.02000	17.78	7.25	17.45	10.20	2.89
0.02400	17.78	7.26	17.46	10.20	2.89
0.02800	17.78	7.26	17.46	10.20	2.88
0.03200	17.56	6.73	16.94	10.20	2.86
0.03600	17.22	5.97	16.17	10.20	2.84
0.04000	16.94	5.32	15.52	10.20	2.82
0.04400	16.54	4.37	14.58	10.20	2.80
0.04800	16.74	4.84	15.04	10.20	2.80
0.05200	17.19	5.88	16.08	10.20	2.79
0.05600	17.23	5.98	16.18	10.20	2.80
0.06000	17.57	6.76	16.96	10.20	2.79
0.06400	18.17	8.15	18.35	10.20	2.75
0.06800	18.73	9.45	19.65	10.20	2.72
0.07200	18.99	10.04	20.25	10.20	2.70
0.07600	19.05	10.19	20.39	10.20	2.68
0.08000	19.17	10.47	20.67	10.20	2.66
0.08400	19.40	11.01	21.21	10.20	2.64
0.08800	19.50	11.23	21.43	10.20	2.62
0.09200	19.45	11.13	21.33	10.20	2.61
0.09600	19.37	10.94	21.15	10.20	2.59
0.10000	19.34	10.86	21.07	10.20	2.57
0.10400	19.46	11.14	21.34	10.20	2.54
0.10800	19.62	11.50	21.70	10.20	2.50
0.11200	19.95	12.27	22.48	10.20	2.47
0.11600	20.58	13.73	23.93	10.20	2.45
0.12000	21.46	15.78	25.98	10.20	2.44
0.12400	22.48	18.13	28.33	10.20	2.42
0.12800	23.55	20.60	30.81	10.20	2.41
0.13200	24.76	23.41	33.61	10.20	2.38
0.13600	26.39	27.19	37.39	10.20	2.32
0.14000	29.33	33.98	44.19	10.20	2.20
0.14400	37.24	52.31	62.51	10.20	1.87
0.14800	46.94	74.76	84.96	10.20	1.46
0.15200	54.03	91.19	101.39	10.20	1.15
0.15600	57.53	99.28	109.48	10.20	0.99
0.16000	58.48	101.49	111.69	10.20	0.92
0.16400	58.17	100.75	110.96	10.20	0.91
0.16800	57.69	99.65	109.85	10.20	0.88
0.17200	57.71	99.69	109.90	10.20	0.81
0.17600	58.27	100.99	111.19	10.20	0.74
0.18000	59.21	103.18	113.38	10.20	0.69
0.18400	59.44	103.70	113.90	10.20	0.66
0.18800	58.40	101.29	111.50	10.20	0.66
0.19200	57.00	98.05	108.26	10.20	0.68
0.19600	57.86	100.04	110.24	10.20	0.80
0.20000	61.65	108.81	119.01	10.20	1.04
0.20400	66.94	121.07	131.28	10.20	1.32
0.20800	72.06	132.92	143.12	10.20	1.57
0.21200	75.48	140.84	151.05	10.20	1.74
0.21600	76.51	143.23	153.43	10.20	1.78
0.22000	75.33	140.49	150.70	10.20	1.68
0.22400	72.81	134.65	144.85	10.20	1.47

TABLA 18. Archivo de Resultados Numéricos "Transnet.out" para el Programa de Régimen Transitorio "Transnet.f90" (continuación ...)

ALTURAS DE PRESIÓN MANOMÉTRICAS Hm Y ALTURAS PIEZOMÉTRICAS H EN LOS NODOS, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

TIEMPO =	NODO	Hm-pié	H-pié									
0.00000 seg.	1	0.00	5.84	2	6.86	14.80	3	5.42	15.62	4	9.07	19.27
	5	10.15	20.35	6	13.29	23.50	7	16.17	16.27	8	10.17	20.37
	9	11.42	21.62	10	17.98	28.18	11	32.44	43.83	12	1.05	44.03
0.80000 seg.	1	0.00	91.37	2	82.53	90.47	3	79.97	90.18	4	78.09	88.29
	5	73.88	84.09	6	74.61	84.81	7	91.49	91.59	8	76.42	86.62
	9	68.51	78.71	10	56.05	66.25	11	31.92	43.31	12	1.05	44.03
1.59999 seg.	1	0.00	31.77	2	24.87	32.81	3	23.34	33.54	4	27.86	38.06
	5	37.34	47.54	6	39.99	50.20	7	49.41	49.51	8	31.51	41.71
	9	36.79	46.99	10	36.86	47.06	11	31.33	42.71	12	1.05	44.03
2.39998 seg.	1	0.00	19.80	2	12.19	20.13	3	10.46	20.66	4	13.21	23.41
	5	17.88	28.08	6	19.51	29.72	7	25.82	25.92	8	16.45	26.65
	9	20.52	30.72	10	25.62	35.82	11	31.69	43.07	12	1.05	44.03
3.19997 seg.	1	0.00	67.09	2	58.75	66.69	3	56.04	66.24	4	53.50	63.70
	5	48.84	59.04	6	46.90	57.10	7	59.54	59.64	8	50.35	60.56
	9	46.40	56.60	10	41.68	51.89	11	34.08	45.47	12	1.05	44.03
3.99996 seg.	1	0.00	42.33	2	34.21	42.15	3	31.89	42.09	4	31.37	41.57
	5	30.09	40.29	6	29.35	39.55	7	38.54	38.64	8	31.09	41.30
	9	30.82	41.02	10	31.58	41.79	11	32.56	43.95	12	1.05	44.03

#### 4.11 RESULTADOS GRÁFICOS DEL MODELO PARA RÉGIMEN TRANSITORIO VERSUS RESULTADOS GRÁFICOS EXPERIMENTALES

El gráfico teórico de Presión vs. Tiempo para cada uno de los nodos de prueba ( 9, 3, 1, 6, 5 y 4 ), se muestra simultáneamente con la onda medida, en cada una de las figuras de la 35 a la 40.

FIGURA 35 Presión vs.Tiempo en Nodo 9 (Teo.y Med.N9;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T11S1;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki.N9)

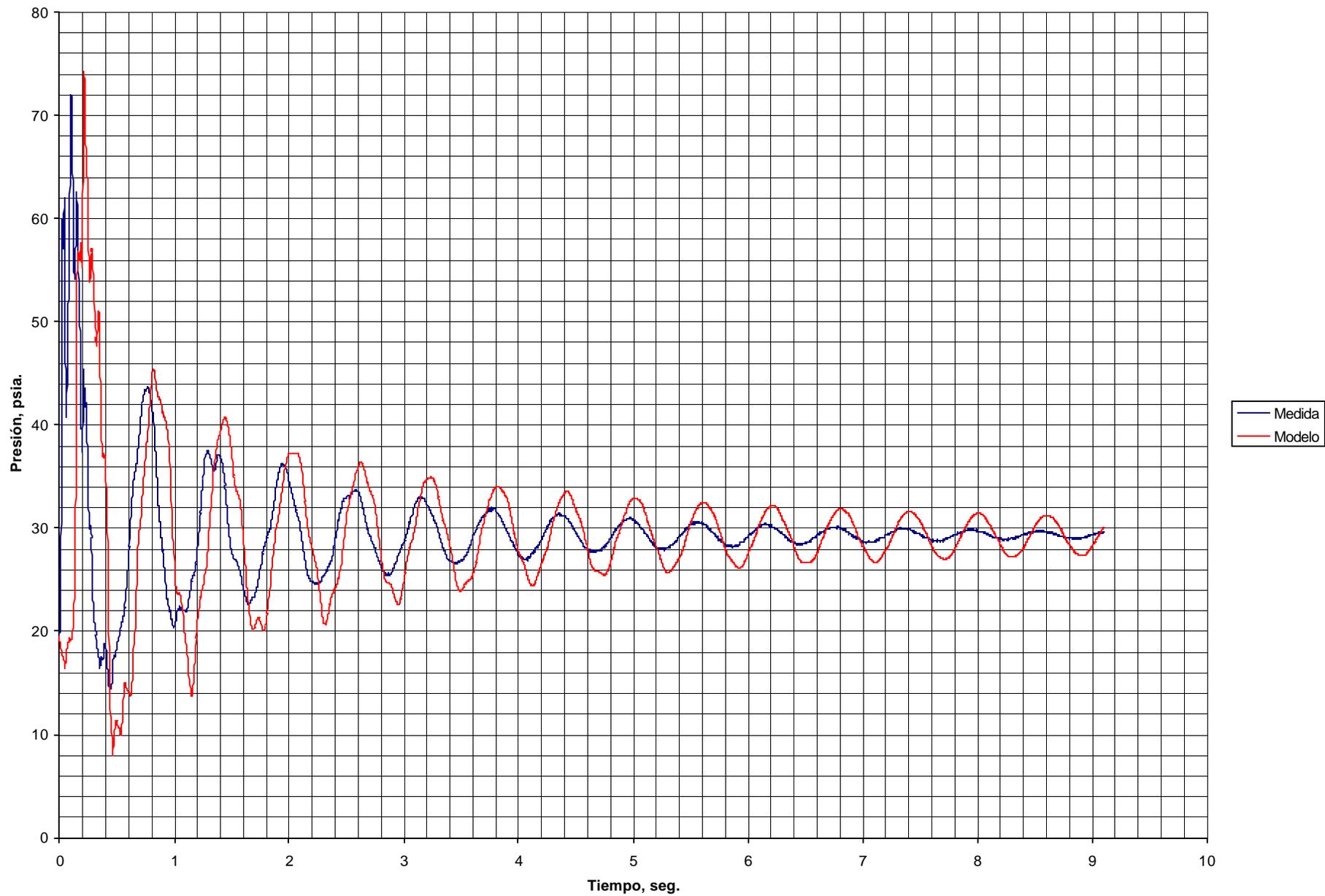


FIGURA 36 Presión vs. Tiempo en Nodo 3 (Teo.y Med.N3;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T2S1;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki.N3

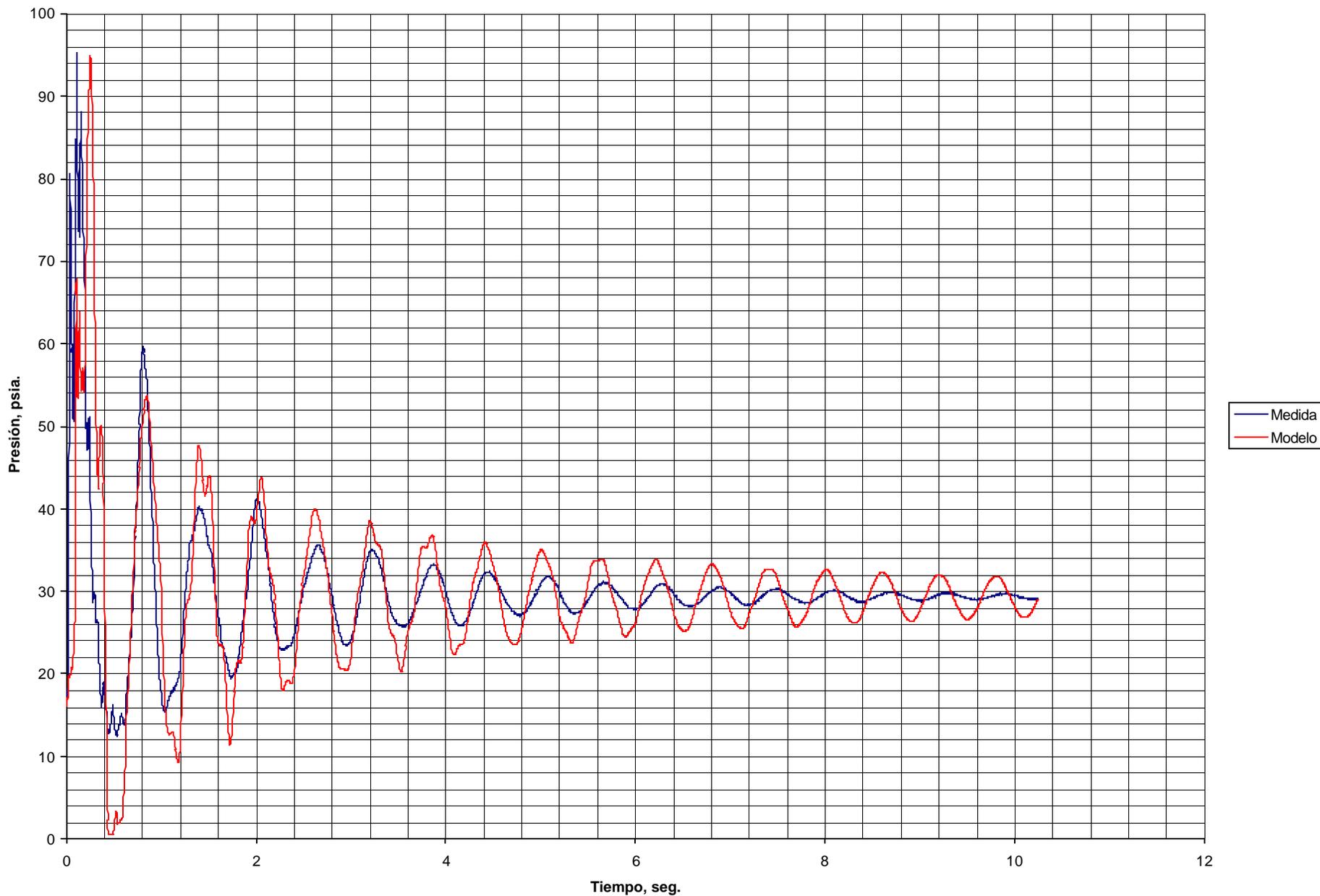


FIGURA 37 Presión vs.Tiempo en Nodo 1 (Teo.y Med.N1;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T1S3;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki.N1)

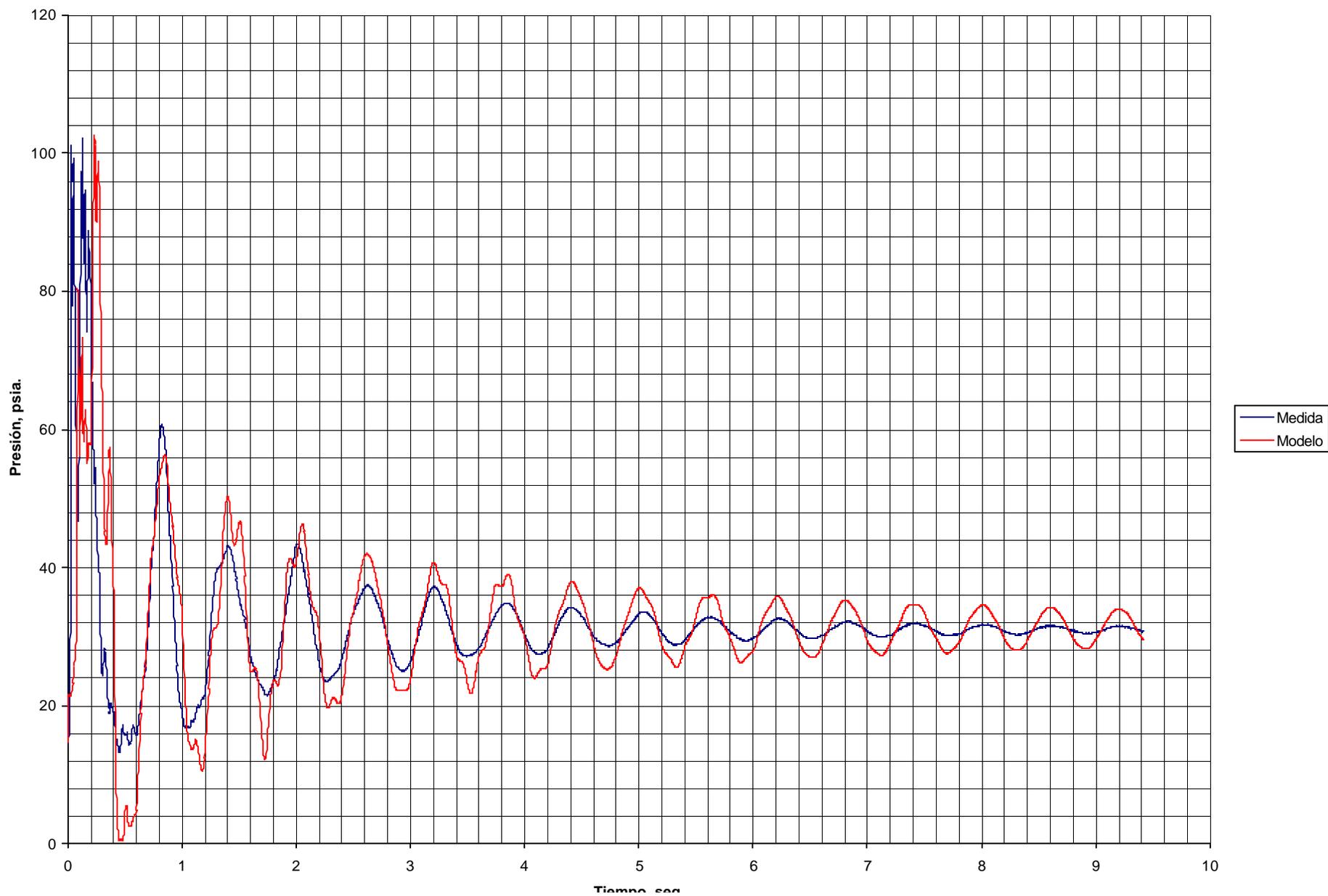


FIGURA 38 Presión vs. Tiempo en Nodo 6 (Teo.y Med.N6;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T5S1;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki.N6)

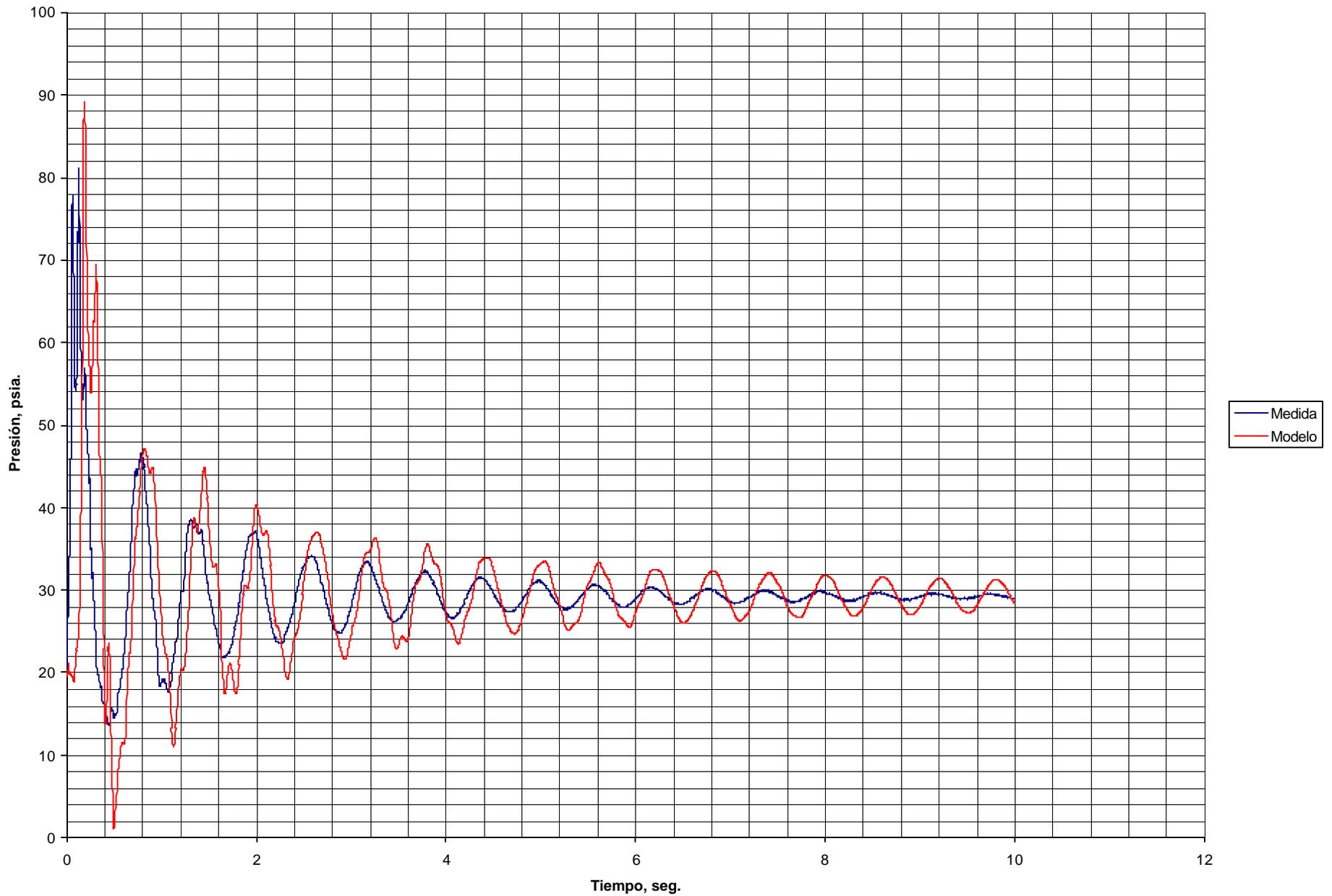


FIGURA 39 Presión vs.Tiempo en Nodo 5 (Teo.y Med.N5;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T4S1;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki N5)

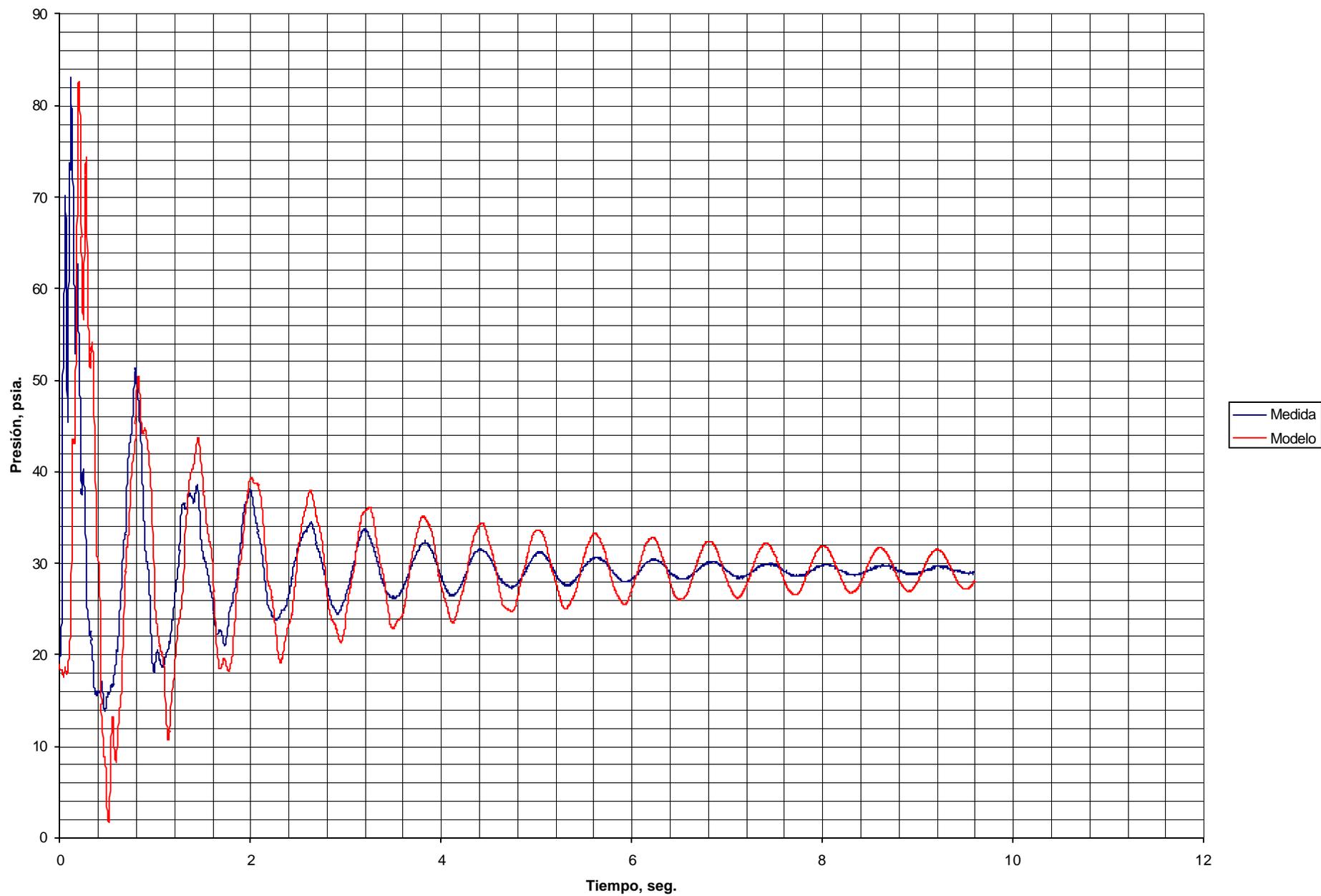
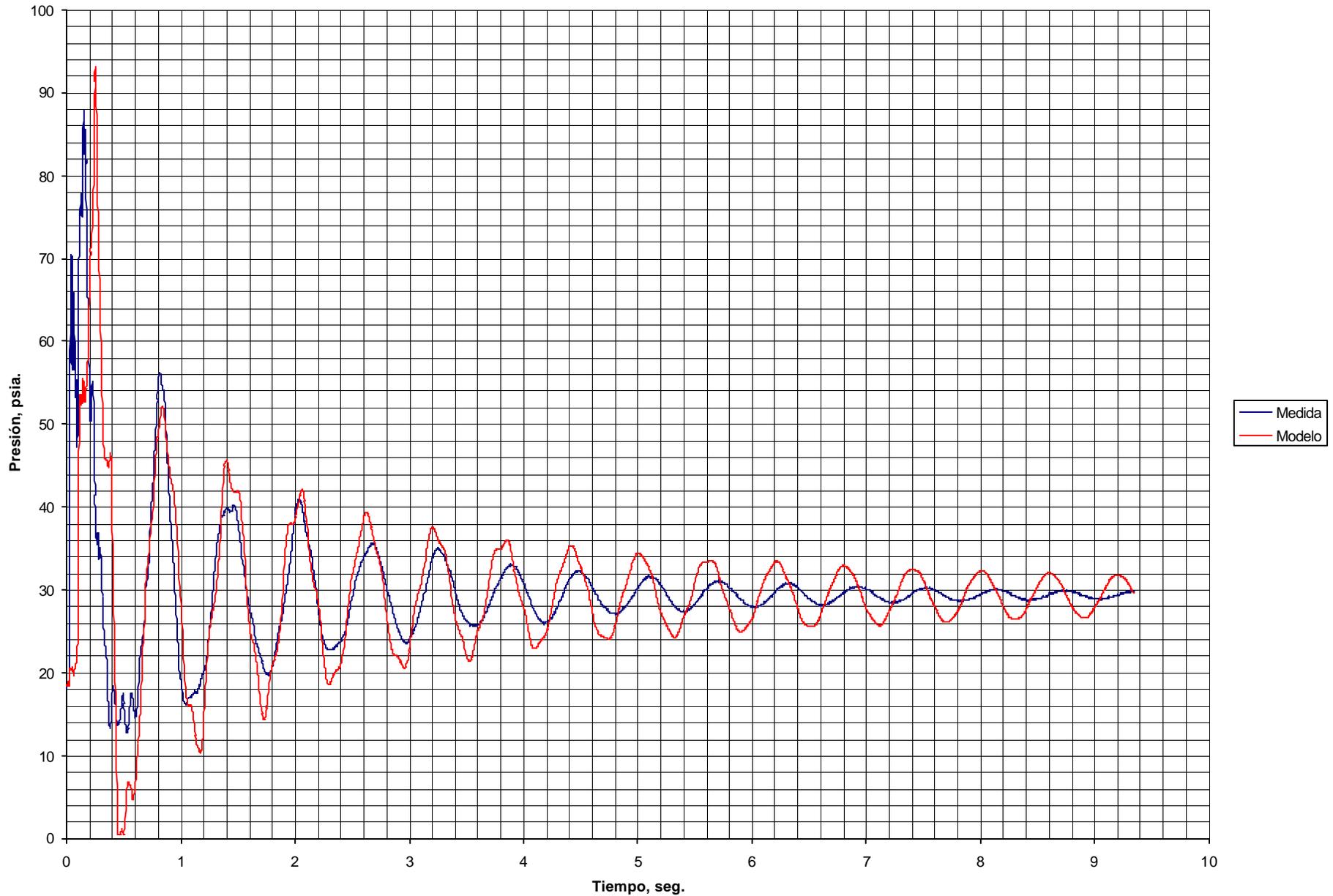


FIGURA 40 Presión vs.Tiempo en Nodo 4 (Teo.y Med.N4;dt=0,004;0,828567\*A(I);2\*F(I);2\*Sumkacc(I);T3S1;Prueba Gráfica.xls;Graf.Cal.2Fi-2Ki.N4)



#### 4.12 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la comparación de la distribución de caudales teórica en régimen estable (proveniente de “Resultados del Análisis de la Red”, en la tabla 6) y la distribución de caudales medida (proveniente de la tabla 9), se puede evidenciar que el error relativo es menor o igual que 9,55 %  $[(\text{Valor medido}-\text{Valor teórico})\times 100/\text{Valor medido}]$ . Mientras que si se compara las presiones nodales teóricas (provenientes de la misma tabla 6) con las presiones nodales medidas (provenientes de la tabla 10), se puede concluir que el error relativo es menor o igual que 1,69 %. Toda esta información está resumida en las tablas 19 y 20.

NODO	PRESIÓN TEÓRICA (psia)	PRESIÓN MEDIDA (psia)	ERROR RELATIVO (%)
1	14,65	14,65	0,00
2	17,62	17,83	1,18
3	17,00	16,99	-0,06
4	18,58	18,90	1,69
5	19,04	19,11	0,37
6	20,40	20,20	-0,99
7	21,65	21,51	-0,65
8	19,05	19,21	0,83
9	19,59	19,42	-0,88
10	22,43	22,31	-0,54
11	28,69	29,03	1,17
12	15,10	Sin medición	

TABLA 19. Comparación de las presiones teóricas y medidas en régimen estable

TUBO	CAUDAL TEÓRICO (pie <sup>3</sup> /seg)	CAUDAL MEDIDO (pie <sup>3</sup> /seg)	ERROR RELATIVO (%)
1	0,0785	0,0801	2,00
2	0,0424	0,0399	-6,27
3	0,0424	0,0399	-6,27
4	0,0218	0,0199	-9,55
5	0,0112	0,0112	0,00
6	0,0361	0,0346	-4,34
7	0,0361	0,0346	-4,34
8	0,0207	0,0205	-0,98
9	0,0207	0,0205	-0,98
10	0,0312	0,0301	-3,65
11	0,0105	0,0111	5,41
12	0,0473	0,0459	-3,05
13	0,0785	0,0801	2,00
14	0,0785	0,0801	2,00

TABLA 20. Comparación de los caudales teóricos y medidos en régimen estable

En cuanto a los resultados en régimen transitorio, después de comparar en cada nodo la curva de presión vs. tiempo medida y la generada por el modelo transitorio (figuras 35 al 40), se puede decir que la mejor aproximación entre ambas fluctuaciones de presión se produce en los primeros 2 picos, observándose a partir de allí una mayor diferenciación entre los picos de presión de ambas ondas. Esto se debe a que los efectos de la fricción en el modelo experimental son mucho más acentuados y por lo tanto, la energía se disipa con mayor rapidez.

En cuanto a la frecuencia, se puede observar que la frecuencia de la onda de presión generada por el modelo, es prácticamente la misma de la onda medida. Es decir, ambas producen el mismo número de ciclos durante el tiempo de estudio del transitorio.

En las figuras antes citadas, se puede observar que la fricción cuasi-estable utilizada en el modelo teórico, produce menos amortiguamiento de los pulsos de presión, que el observado en la onda de presión medida. De la comparación también es evidente que existe un desfase muy leve en los pulsos de presión de la onda generada por el modelo respecto a la onda medida. Estos dos efectos son muy comunes en los estudios de transitorios y aparecen reportados tanto en el trabajo de Brunone [6] y como en el de Zielke [92].

En cuanto a la presión máxima, existe una buena concordancia entre los resultados del modelo teórico y las mediciones, como se evidencia en las figuras 35 al 40. En las mismas también se puede observar, que la amplitud máxima de oscilación es ligeramente superior en la onda del modelo teórico.

## 5. LIMITACIONES

Durante el desarrollo del trabajo se presentaron algunas limitaciones de índole económica y de tiempo, tales como:

- Por restricciones presupuestaria, la compra tanto del hardware como del software de adquisición de datos, no se pudo realizar sino en mayo del 2002, a pesar que el proyecto fue aprobado en mayo del 2000 por el Concejo de la Facultad de Ingeniería.
- Sólo se pudo comprar un transductor de presión de los cuatro contemplados originalmente en el presupuesto.
- No se contó con un medidor de caudal para régimen transitorio, ya que el medidor de caudal ultrasónico que posee el Departamento de Hidráulica no tiene capacidad para adquirir caudal o velocidad en dicho régimen.

## 6. CONCLUSIONES

1. Se han alcanzado los objetivos propuestos en el presente trabajo, ya que el modelo transitorio obtenido es capaz de simular o reproducir el flujo transitorio en una red de tuberías.
2. De la comparación de las curvas presión vs. tiempo del modelo y de la medición, se puede evidenciar que en cuanto a la frecuencia y pico de la onda, que son los que determinan la estabilidad estructural de un sistema de tuberías, los resultados del modelo transitorio, concuerdan bien con las mediciones. Es decir, las frecuencias son prácticamente las mismas y los valores máximos de presión tienden a ser iguales.
3. Con el modelo transitorio obtenido, se evidenció que el factor de fricción cuasi-estable  $f_q$  produce menos amortiguamiento de los pulsos de presión que el observado en las fluctuaciones de presión medidas, es decir, la energía en el modelo no se disipa con la rapidez que se observa en las curvas presión vs. tiempo medidas.
4. Los resultados del análisis de la red en régimen estable, concuerdan muy bien con las mediciones de caudales y presiones nodales.
5. La metodología y tecnología utilizada en este trabajo, probó ser confiable.

## 7. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que en una próxima investigación, se mejore la precisión del modelo incorporando algunas expresiones analíticas para modelar la fricción transitoria  $f_t$ , tales como la fórmula de Brunone [6] o la de Zielke [92], que podrían conferir al modelo una mayor capacidad para disipar energía rápidamente.
2. También se sugiere aplicar la tecnología empleada en este trabajo, a otros proyectos de Investigación del Instituto de Mecánica de Fluidos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Almeida, A.B., Manual de Protecção Contra o Golpe de Aríete em Conductas Elevatórias (Handbook of Protection against Waterhammer in Pumping Systems ), LNEC, Lisbon, 1982.
2. Almeida, A.B., Protecção Contra o Golpe de Aríete( Protection against Waterhammer ), Sanitary Engineering Handbook, DGRN, Lisbon, 1991.
3. Almeida, A.B. y Coello E. Fluid Transients in Pipe Networks. Computational Mechanics Publications, 1992, Southampton, U.K.
4. Bergeron, L. Waterhammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity. John Wiley and Sons, Inc., New York 1961.
5. Beyond, Jeffrey. Hands-on Exercise Manual for LabVIEW Programming, Data Acquisition and Analysis. Prentice Hall, Inc. 2001, Upper Saddle River, NJ, USA.
6. Brunone, B., Golia, U.M., and Grego, M. Some remarks on the momentum equation for fast transients. Int. Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation, 9th Round Table, IAHR, Valencia, Spain, 140-148.

7. Cabrera, Enrique. Análisis del Golpe de Ariete en Impulsiones Protegidas por Válvulas de Alivio ( Waterhammer Analysis for Pipelines Protected by Relief Valves ), “Tecnología del Agua”, Vol.26, April (1986), pp.8.
8. Cabrera, Enrique. Development of a Computer Programme for the Calculation of Water Hammer Protection Devices by Sensitivity Analysis, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Computer Methods and Water Resources, Vol.2, Computational Hydraulics, Morocco, 1988, pp. 203 – 215.
9. Cátedra de Mec. De Fluidos, Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Aguas, “ Univ. Pol. de Valencia”, IEAL, Madrid, 1987.
10. Chaudhry, M. H. Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold, 1987, 2<sup>nd</sup> ed., New York, NY, USA.
11. Clarke, D.S., Surge Suppression – A Warning, Proceedings of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, BHRA, Manchester , 1985, pp.39 – 54.
12. Deen, J.K. and Reintsema, S.R., Modelling of High – Pressure Gas Transmission Lines, Appl. Math. Modelling, Vol.7, August, (1983), pp.268- 273.

13. DUPONT, A., Hidraulique Urbaine ( Urban Hydraulics ), Eyrolles, París, 1974.
14. Eco, Humberto. Como se Hace una Tesis. Buenos Aires, Compañía Impresora Argentina, S.A. 1978, segunda edición.
15. ESDU, Engineering Data, Fluid Mechanics, Internal Flow, Vol.10a ( Fluid Transients in Pipes and Tunnels). Vol. 10b ( Fluid Transients ) London.
16. Evangelisti, G., Teoria Generale del Colpo D' Ariete col Metodo delle Caratteristiche ( General Theory of Waterhammer with Characteristic Method), “ L' Energia Elettrica” , 1965, N° 2, pp. 65 – 90 and N° 3, pp. 145 – 162.
17. Fox, J. A. Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks, MacMillan Press, 1977, London, U.K.
18. Fox, J.A., Transient Flow in Pipes, Open Channels and Sewers, Ellis Horwood Series in C. Engineering, 1989.
19. Fox, Robert y Mc Donald, A. Introducción a la Mecánica de Fluidos. Mc Graw-Hill Interamericana de México, S. A., Atlacomulco, cuarta edición 1995.
20. Franzini, J.B. y Daugherty, R.L. Fluid Mechanics with Engineering Applications. Mc Graw-Hill Book Co., New York 1965, sexta edición.

21. García M., Felix. Lenguaje de Programación Fortran 90. Editorial Paraninfo, Madrid, España, 1999.
22. Giles, Ranald V. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. México, Libros Mc Graw-Hill de México, S.A. 1978, segunda edición.
23. Guarca, R. and Aguilar, L., Selección del Dispositivo Primario de Control de Transitorio Hidráulico en Algunos Acueductos Construidos en México (Choice of Hydraulic Transient Control structures in some Mexican Systems), Proceedings of The “XII Congreso Latino Americano de Hidráulica”, AIPH-IAHR, pp.365-375.
24. Hernández, Roberto; Fernández, Carlos y Baptista, Pilar. Metodología de la Investigación. Mc Graw-Hill Interamericana de México, S.A. 1985, Atlacomulco, México, primera edición.
25. Izquierdo, Joaquín; Abreu, José y Guarga, Rafael. Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión. Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (España), primera edición 1995.
26. Jaeger, C. Fluid Transients in Hydroelectric Engineering Practice. Blackie and Sons, Ltd. Glasgow and London 1977.

27. Jeppson, R.W. Analysis of Flow in Pipe Networks. Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan 1976.
28. Johnson, Gary y Jennings, Richard. LabVIEW Graphical Programming. Mc Graw-Hill, New York, NY 2001, USA. Tercera edición.
29. Kaplan, M., Streeter, V. and Wylie, E.B., Computation of Oil Pipeline Transients, Journal of the Pipeline Division, ASCE, Vol.93, PL3, November, (1967), pp. 59 – 72.
30. Kentish D., N.W. Tuberías Industriales. Bilbao, Urmo, S.A. de Ediciones 1989, primera edición.
31. Koelle, E., Transientes Hidráulicos em Instalações de Conductas Forçadas ( Hydraulic Transients in Pressure Pipelines ), University of S. Paulo, S.Paulo, Brazil, 1983.
32. Lamson Whitney, Frederick. Elementos de Investigación. Barcelona, Ediciones Omega, S.A. 1976, cuarta edición.
33. Lencastre, A., Hidráulica ( Hydraulics), “ Hidroprojecto” ( Ed. Lusos – Brasileira ), Lisbon, 1983.

34. Liou, C.P., A Numerical Model for Transients in Petroleum Products Pipelines, Proceedings of the Numerical Methods for Fluid Transients, ASME, FED – Vol.4, Houston, 1983, pp. 61- 66.
35. Liou, C.P. and Wylie, E.B., One Dimensional Gas Flow with Internal Heating, Proceedings of the Numerical Methods for Fluid Transients, ASME, FED – Vol.4, Houston, 1983, pp. 29 – 38.
36. Liou, C.P., Acoustic Wave Speeds for Slurries in Pipelines, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110, N° 7, (1984), pp. 945 – 957.
37. Martins, R.M., Reservatório Hidropneumático em Tubulações de Recalque ( Air Vessel in Pumping Systems ), Master Thesis, University of S. Paulo, Brazil, 1980.
38. Mataix, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. México, Programas Educativos, S.A. 1977, primera edición.
39. Mc Cracken, Daniel. Programación FORTRAN IV. Editorial Limusa, S.A., México D.F., 1979, segunda edición.
40. Méndez, Manuel V. Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua. Editorial Texto, Publicaciones UCAB, Caracas, 1995.

41. Mercado, Salvador. Como Hacer una Tesis. México, Editorial Limusa, S.A. 1990, primera edición.
42. Michael, Etzel y Dickinson, Karen. Digital Visual Fortran Programmer's guide. Digital Press, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, USA 1999.
43. Mihura, Bruce. LabVIEW for Data Acquisition. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, USA 2001.
43. Miller, D.S., Internal Flow, BHRA, 1977.
44. Morles, Victor. Planeamiento y Análisis de Investigaciones. Caracas, Ediciones de la Facultad de Humanidades y Educación de la UCV, 1980, tercera edición.
45. Munson Bruce, Young Donald y Okishi Theodore. Fundamentals of Fluid Mechanics. John Wiley and Sons, Inc. Toronto, Canada, 1990.
46. National Instruments Corporation. LabVIEW User Manual. Austin, Texas, USA, Edición de Julio del 2000
47. National Instruments Corporation. Lab VIEW Hands-on Seminar Manual. Austin, Texas, USA, Edición de Enero del 2002

48. National Instruments Corporation. LabVIEW Measurements Manual. Austin, Texas, USA, Edición de Julio del 2000.
49. National Instruments Corporation. LabVIEW User Manual. Austin, Texas, USA, Edición de Julio del 2000.
50. Osiadacz, A.J., Simulation and Analysis of Gas Networks, SPON, London, 1987.
51. Panametrics Limited. Transport Model PT868 Portable Flow Meter-User's Manual. Panametrics, PCI División, Technical Publications Department, Waltham, Massachusetts, USA, 1999.
52. Paredes, C.R. y Moreno, L.A., Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión (Hydraulic Transients in Pressure Pipelines), “Ingeniería Hidráulica en México”, January – April, ( 1987), pp. 29 – 52.
53. Parmakian, J. Waterhammer Analysis. Dover Publications, Inc. New York, 1963.
54. Parmakian, J., Waterhammer Analysis, New York, Prentice Hall, 1955.
55. Pejovic, S., Boldy, A.P. and Obradovic, D., Guidelines to Hydraulic Transient Analysis, Technical Press, 1987.

56. Pickford, J. Analysis of Water Surge. Gordon and Breach Science Publishers, London 1969.
57. Quesada, José. Redacción y Presentación del Trabajo Intelectual. Madrid: Paraninfo, S.A. 1987, segunda edición.
58. Rich, G. Hydraulic Transients. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1951.
59. Rich, G.R., Hydraulic Transients, Dover Publications, New York, 1963.
60. Ricks, B.L., Application of Pressure Transient Analysis in a Long - Distance Slurry Pipeline, Journal of Pipelines, Vol.3, (1982), pp. 73 – 86.
61. Rieder, Willians y Busby Henry. Introductory Engineering Modeling Emphasizing Differential Models and Computer Simulations. John Wiley and Sons, Inc. 1986 NY, USA.
62. Rivero, Melesio. La Comprobación Científica. México, Editorial Trillas, S.A. 1990, tercera edición.
63. Rojas, Raúl. El Proceso de la Investigación Científica. México, Editorial Trillas, S.A. 1990, cuarta edición.

64. Rouse, H. y Ince S. History of Hydraulics. Dover Publications, Inc. New York 1963.
65. Sabino, Carlos. El Proceso de Investigación. Caracas, Editorial Panapo, S.A. 1986, primera edición.
66. Sharp, B.B. Waterhammer, Problems and Solutions. Edward Arnold Publishers, Ltd., London, 1981.
67. SIGTTO, Guidelines for the Alleviation of Excessive Surge Pressures on ESD, Soc. Of International Gas Tanker and Terminal Operators, London, 1987.
68. Sorenson, K.E. y Davis, C.V. Handbook of Applied Hydraulics. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1969, tercera edición.
69. Stephenson, D., Pipeline Design for Water Engineers, Developments in Water Science, Vol.15, Elsevier, 1976.
70. Stoner, M., Analysis and Control of Natural Gas Piping Systems, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.91, N° 3, September, (1969).
71. Streeter, Victor. Mecánica de los Fluidos. México: Libros Mc Graw-Hill de México, S.A. 1976, primera edición.

72. Streeter, V.L. and Wylie, E.B., Transient Analysis of Offshore Loading Systems, Transactions of the ASME, Journal of the Engineering for Industry, Paper 74 – Pet – 2, (1974), 7p..
73. Suarez, B., Onate, E .and Albareda , R., A Finite Element Formulation for the Analysis of the Non Linear Transient Response of Natural Gas in Urban Pipe Networks, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference, Barcelona, April, 1984, pp. 577 – 584.
74. Szucs, Ervin. Similitude and Modeling. Budapest, Akadémiai Kadó, 1980, Hungría.
75. Tamayo y Tamayo, Mario. El Proceso de la Investigación Científica, Fundamentos de Investigación. México, Editorial Limusa, S.A. 1985, primera edición.
76. Thorley, A.R.D. and Wiggert, D.C., Some Comments on the Basic Equations for Unsteady One – Dimensional Heterogeneous Flow, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Water Column Separation, IAHR, Obernach, 1981, pp. 229 – 248.
77. Thorley, A.R.D., Wave Propagation in Two – Component (Solid – Liquid ) Mixtures, Proceedings of the “ 4° Incontro Internazionale Sul Distacco di Vena”, ENEL, Cagliari, 1979, pp. 154 - 171.

78. Thorley, A.R.D., Transient Propagation in Slurries with Hold – Up, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.106, HY8, August, (1980), pp. 1353 – 1364.
79. Thorley, A.R.D. and Enever, K.J., Control and Suppression of Pressure Surges in Pipelines and Tunnels, CIRIA, Report 84, 1989.
80. Timoshenko, S. Strength of Materials, Tomo I, D. Van Nostrand Co., Inc., New York, 1955.
81. Tullis, J.P., Hydraulics of Pipelines, Pumps, Valves, Cavitation , Transients, Wiley – Interscience Publication, New York, 1989.
82. UPEL. Manual de Trabajos de Grado de Maestría y Tesis Doctorales. Publicaciones de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas 1990, primera edición.
83. Vela, Antonio; Cabrera, Enrique y Abreu, José. Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Publicaciones de la Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 1992, España.
84. Vennard, J.K. Elementary Fluid Mechanics. John Wiley and Sons, Inc., New York 1961, Cuarta edición.

85. Watters, G. Z. Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines. ButterWorth Publishing, 1984, Stoneham, Mass.
86. Watters, G.Z., Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, Ann Arbor Science, 1984.
87. Wood, D.J., Unsteady Flow of Solid – Liquid Suspensions, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASME, Vol.92, EM6, December, (1966), pp. 117 – 134.
88. Wood, D.J., and Kao, T.Y., Transient Flow of Solid – Liquid Mixtures in Pipes, Advances in Solid – Liquid Flow in Pipes and its Application, Ed. I Zandi, Pergamon Press, 1971, pp. 87 – 100.
89. Wood, D.J. y Rayes, A.G. Reliability of Algorithms for Pipe Network Analysis”, Journal Hydraulics Div., ASCE, V107, No. 10, 1981.
90. Wylie, E. B. y Streeter, V. L. Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, 1993 Englewood Cliffs, NJ.
91. Wylie, E.B., and Streeter, V.L., Fluid Transients, McGraw – Hill, 1978.

92. ZielKe, W. Frequency-dependet friction in transient pipe flow. Journal of Basic Engineering, 1968, ASME, 90(1), 109-115.

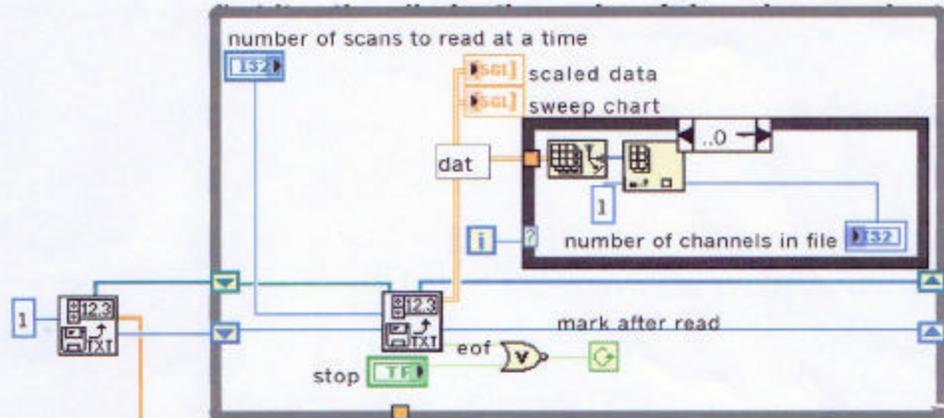
93. Zorrilla, Santiago y Torres, Miguel. Guía para Elaborar la Tesis. México, Nueva Editorial Interamericana, S.A. 1986, primera edición.

# ANEXOS

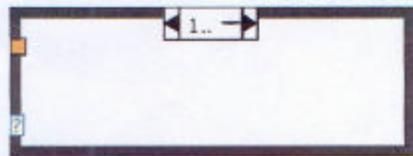
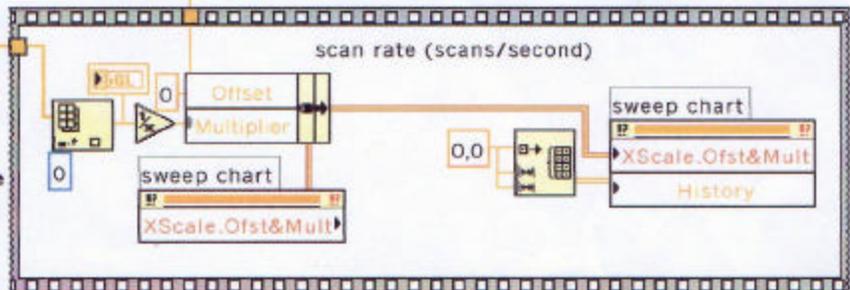
# ANEXO 1

Display Acq'd Spreadsheet File Denis.vi  
C:\Mis documentos\Display Acq'd Spreadsheet File Denis.vi  
Last modified on 15/09/02 at 06:59 p.m.  
Printed on 27/04/04 at 01:59 a.m.

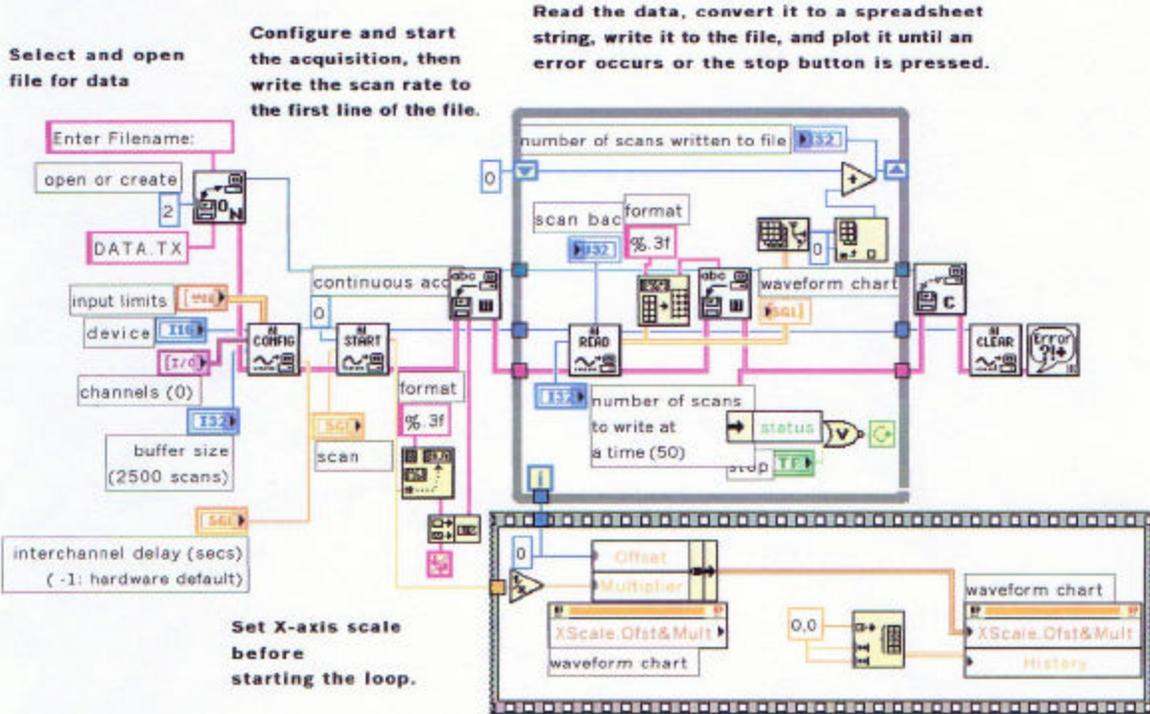
**On each loop iteration, read the requested number of scan (each one line in the file), then plot the results. On the**



**Read the scan rate (first number of first line in the file) and set x-axis scale of the chart before starting the loop.**



Cont Acq to Spreadsheet File Denis.vi  
C:\Mis documentos\Cont Acq to Spreadsheet File Denis.vi  
Last modified on 27/04/04 at 02:12 a.m.  
Printed on 27/04/04 at 02:12 a.m.



## ANEXO 2

## ANEXO 2. RESULTADOS DEL MODELO

\*\*\*\*\*  
 \* PRESIÓN ABS., Hm, H, Y VELOCIDAD vs. TIEMPO PARA EL NODO 2 (solo hasta 0,224 seg.)\*  
 \*\*\*\*\*

TUBO # 1 SECCION # 1

TIEMPO-seg.	PRESIÓN-psia.	H.presión-pié	H.piezom-pié	COTA-pié	VEL-pié/seg.
0.00000	17.61	6.86	14.80	7.94	5.24
0.00400	17.45	6.48	14.42	7.94	5.22
0.00800	16.49	4.26	12.20	7.94	5.30
0.01200	18.49	8.91	16.85	7.94	5.05
0.01600	19.06	10.21	18.15	7.94	4.97
0.02000	19.59	11.43	19.37	7.94	4.95
0.02400	19.81	11.96	19.90	7.94	4.96
0.02800	20.10	12.63	20.57	7.94	4.93
0.03200	20.38	13.27	21.21	7.94	4.89
0.03600	20.39	13.29	21.23	7.94	4.87
0.04000	20.32	13.14	21.08	7.94	4.85
0.04400	20.41	13.35	21.29	7.94	4.83
0.04800	20.63	13.85	21.79	7.94	4.80
0.05200	20.84	14.34	22.28	7.94	4.75
0.05600	21.32	15.46	23.39	7.94	4.67
0.06000	21.76	16.46	24.40	7.94	4.57
0.06400	22.17	17.42	25.35	7.94	4.49
0.06800	22.74	18.75	26.69	7.94	4.39
0.07200	23.41	20.30	28.24	7.94	4.28
0.07600	24.19	22.08	30.02	7.94	4.18
0.08000	25.12	24.25	32.19	7.94	4.07
0.08400	26.47	27.37	35.31	7.94	3.91
0.08800	28.92	33.05	40.99	7.94	3.61
0.09200	34.87	46.83	54.77	7.94	2.90
0.09600	54.25	91.68	99.62	7.94	0.65
0.10000	61.78	109.13	117.07	7.94	-0.08
0.10400	66.82	120.79	128.73	7.94	-0.07
0.10800	68.94	125.70	133.64	7.94	0.09
0.11200	66.98	121.16	129.10	7.94	0.43
0.11600	64.21	114.74	122.68	7.94	0.65
0.12000	61.67	108.86	116.80	7.94	0.51
0.12400	60.67	106.54	114.48	7.94	0.21
0.12800	61.72	108.98	116.91	7.94	-0.08
0.13200	64.52	115.47	123.40	7.94	-0.38
0.13600	65.42	117.55	125.48	7.94	-0.37
0.14000	65.08	116.75	124.69	7.94	-0.18
0.14400	63.92	114.07	122.01	7.94	0.00
0.14800	62.29	110.30	118.24	7.94	0.10
0.15200	60.82	106.91	114.85	7.94	0.08
0.15600	59.81	104.55	112.49	7.94	-0.04
0.16000	59.36	103.52	111.46	7.94	-0.17
0.16400	59.33	103.45	111.39	7.94	-0.23
0.16800	59.34	103.47	111.41	7.94	-0.21
0.17200	59.08	102.86	110.80	7.94	-0.12
0.17600	58.53	101.59	109.53	7.94	-0.01
0.18000	57.91	100.16	108.09	7.94	0.07
0.18400	57.50	99.21	107.15	7.94	0.09
0.18800	57.52	99.26	107.20	7.94	0.07
0.19200	58.13	100.67	108.61	7.94	0.04
0.19600	59.28	103.33	111.27	7.94	0.06
0.20000	60.82	106.89	114.83	7.94	0.12
0.20400	63.05	112.05	119.99	7.94	0.25
0.20800	67.15	121.56	129.50	7.94	0.49
0.21200	72.54	134.03	141.97	7.94	0.77
0.21600	78.14	146.99	154.93	7.94	1.00
0.22000	83.33	159.01	166.95	7.94	1.12
0.22400	88.02	169.87	177.80	7.94	1.06

## ANEXO 2. RESULTADOS DEL MODELO(continuación ...)

\*\*\*\*\*  
 \* PRESIÓN ABS., Hm, H, Y VELOCIDAD vs. TIEMPO PARA EL NODO 2 (solo hasta 0,224 seg.)\*  
 \*\*\*\*\*

TUBO # 2 SECCION # 2

TIEMPO-seg.	PRESIÓN-psia.	H.presión-pié	H.piezom-pié	COTA-pié	VEL-pié/seg.
-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.00000	17.61	6.86	14.80	7.94	2.83
0.00400	18.05	7.87	15.81	7.94	2.81
0.00800	17.08	5.63	13.57	7.94	2.84
0.01200	19.10	10.30	18.24	7.94	2.71
0.01600	19.61	11.49	19.43	7.94	2.66
0.02000	20.12	12.66	20.60	7.94	2.68
0.02400	20.35	13.21	21.15	7.94	2.70
0.02800	20.65	13.89	21.83	7.94	2.69
0.03200	20.92	14.52	22.46	7.94	2.67
0.03600	20.92	14.53	22.47	7.94	2.64
0.04000	20.85	14.35	22.29	7.94	2.62
0.04400	20.93	14.54	22.48	7.94	2.61
0.04800	21.14	15.03	22.97	7.94	2.59
0.05200	21.34	15.50	23.44	7.94	2.56
0.05600	21.81	16.59	24.53	7.94	2.51
0.06000	22.23	17.55	25.49	7.94	2.48
0.06400	22.63	18.48	26.42	7.94	2.45
0.06800	23.19	19.79	27.73	7.94	2.40
0.07200	23.84	21.29	29.23	7.94	2.34
0.07600	24.59	23.03	30.97	7.94	2.29
0.08000	25.51	25.16	33.10	7.94	2.24
0.08400	26.85	28.24	36.18	7.94	2.16
0.08800	29.27	33.86	41.80	7.94	2.01
0.09200	35.18	47.53	55.47	7.94	1.67
0.09600	54.46	92.16	100.10	7.94	0.59
0.10000	61.81	109.19	117.13	7.94	0.33
0.10400	66.83	120.80	128.74	7.94	0.64
0.10800	68.97	125.77	133.71	7.94	0.93
0.11200	67.05	121.31	129.25	7.94	1.17
0.11600	64.31	114.98	122.92	7.94	1.23
0.12000	61.78	109.12	117.06	7.94	0.96
0.12400	60.74	106.70	114.64	7.94	0.61
0.12800	61.75	109.04	116.98	7.94	0.35
0.13200	64.53	115.49	123.43	7.94	0.19
0.13600	65.42	117.55	125.49	7.94	0.24
0.14000	65.08	116.76	124.70	7.94	0.40
0.14400	63.93	114.10	122.04	7.94	0.50
0.14800	62.31	110.35	118.29	7.94	0.50
0.15200	60.84	106.95	114.89	7.94	0.40
0.15600	59.82	104.58	112.52	7.94	0.23
0.16000	59.36	103.53	111.46	7.94	0.08
0.16400	59.33	103.45	111.39	7.94	0.01
0.16800	59.34	103.47	111.41	7.94	0.02
0.17200	59.08	102.86	110.80	7.94	0.07
0.17600	58.53	101.59	109.53	7.94	0.11
0.18000	57.91	100.16	108.10	7.94	0.11
0.18400	57.50	99.21	107.15	7.94	0.06
0.18800	57.52	99.26	107.20	7.94	-0.01
0.19200	58.13	100.67	108.61	7.94	-0.04
0.19600	59.28	103.33	111.27	7.94	-0.02
0.20000	60.82	106.89	114.83	7.94	0.05
0.20400	63.05	112.05	119.99	7.94	0.11
0.20800	67.15	121.56	129.50	7.94	0.09
0.21200	72.54	134.03	141.97	7.94	0.01
0.21600	78.14	146.99	154.93	7.94	-0.06
0.22000	83.33	159.01	166.95	7.94	-0.07
0.22400	88.02	169.86	177.80	7.94	-0.07

## ANEXO 2. RESULTADOS DEL MODELO(continuación ...)

\*\*\*\*\*  
 \* PRESIÓN ABS., Hm, H, Y VELOCIDAD vs. TIEMPO PARA EL NODO 2 (solo hasta 0,224 seg.)\*  
 \*\*\*\*\*

TUBO # 7 SECCION # 15

TIEMPO-seg.	PRESIÓN-psia.	H.presión-pié	H.piezom-pié	COTA-pié	VEL-pié/seg.
-----	-----	-----	-----	-----	-----
0.00000	17.61	6.86	14.80	7.94	2.41
0.00400	17.77	7.22	15.16	7.94	2.41
0.00800	16.81	5.00	12.94	7.94	2.46
0.01200	18.83	9.68	17.62	7.94	2.34
0.01600	19.36	10.91	18.85	7.94	2.31
0.02000	19.88	12.11	20.05	7.94	2.28
0.02400	20.10	12.63	20.56	7.94	2.26
0.02800	20.39	13.28	21.22	7.94	2.24
0.03200	20.66	13.91	21.85	7.94	2.22
0.03600	20.66	13.93	21.86	7.94	2.22
0.04000	20.60	13.77	21.71	7.94	2.23
0.04400	20.69	13.98	21.92	7.94	2.22
0.04800	20.90	14.48	22.42	7.94	2.20
0.05200	21.11	14.96	22.90	7.94	2.19
0.05600	21.59	16.07	24.01	7.94	2.16
0.06000	22.02	17.06	25.00	7.94	2.09
0.06400	22.41	17.97	25.91	7.94	2.04
0.06800	22.97	19.28	27.22	7.94	1.99
0.07200	23.63	20.80	28.74	7.94	1.95
0.07600	24.39	22.57	30.50	7.94	1.89
0.08000	25.32	24.71	32.65	7.94	1.83
0.08400	26.66	27.80	35.74	7.94	1.75
0.08800	29.09	33.44	41.38	7.94	1.60
0.09200	35.01	47.15	55.09	7.94	1.22
0.09600	54.33	91.87	99.81	7.94	0.06
0.10000	61.78	109.13	117.07	7.94	-0.40
0.10400	66.81	120.77	128.70	7.94	-0.71
0.10800	68.91	125.63	133.57	7.94	-0.84
0.11200	66.94	121.07	129.01	7.94	-0.73
0.11600	64.18	114.67	122.61	7.94	-0.58
0.12000	61.65	108.82	116.76	7.94	-0.45
0.12400	60.66	106.52	114.45	7.94	-0.39
0.12800	61.71	108.96	116.89	7.94	-0.44
0.13200	64.51	115.44	123.38	7.94	-0.58
0.13600	65.40	117.50	125.44	7.94	-0.61
0.14000	65.06	116.71	124.65	7.94	-0.58
0.14400	63.90	114.03	121.97	7.94	-0.50
0.14800	62.28	110.27	118.21	7.94	-0.40
0.15200	60.82	106.89	114.83	7.94	-0.32
0.15600	59.80	104.54	112.48	7.94	-0.27
0.16000	59.36	103.51	111.45	7.94	-0.25
0.16400	59.33	103.44	111.38	7.94	-0.25
0.16800	59.34	103.46	111.40	7.94	-0.23
0.17200	59.07	102.85	110.79	7.94	-0.19
0.17600	58.53	101.59	109.53	7.94	-0.12
0.18000	57.91	100.15	108.09	7.94	-0.04
0.18400	57.50	99.21	107.15	7.94	0.03
0.18800	57.52	99.26	107.20	7.94	0.07
0.19200	58.13	100.67	108.61	7.94	0.08
0.19600	59.28	103.33	111.27	7.94	0.07
0.20000	60.82	106.89	114.83	7.94	0.07
0.20400	63.05	112.05	119.99	7.94	0.14
0.20800	67.15	121.56	129.50	7.94	0.40
0.21200	72.55	134.05	141.99	7.94	0.76
0.21600	78.17	147.06	155.00	7.94	1.05
0.22000	83.39	159.15	167.09	7.94	1.19
0.22400	88.10	170.05	177.98	7.94	1.13

## ANEXO 3

## ANEXO 4

## ANEXO 5