



## MODELO BIPARAMÉTRICO DE CARACTERIZACIÓN DE ACCESORIOS PARA REDES HIDRÁULICAS

MANUEL A. SANCHEZ, FRANCISCO ALBA JUEZ, RAMÓN FIDALGO NOVÁS,  
CARLOS M. GUEVARA

Universidad Nacional de San Juan  
Departamento Instituto de Mecánica Aplicada  
Libertador Gral. San Martín 1109 – Oeste – 5400 San Juan – Argentina

*(Recibido 18 de diciembre de 2004, para publicación 10 de febrero de 2008)*

**Resumen** – Aquí se presenta un trabajo de investigación realizado para analizar la problemática sobre las pérdidas secundarias en accesorios hidráulicos, y el modelo matemático que las representa. Se han ensayado diversos accesorios y se han analizado los resultados, proponiendo un nuevo modelo para caracterizarlos.

**Palabras clave** – Mecánica de fluidos, tuberías, pérdidas de carga.

### 1. INTRODUCCIÓN

Un problema frecuente en el cálculo de sistemas de tuberías por donde circula un fluido Newtoniano, consiste en la poca información que existe sobre los coeficientes de pérdidas en accesorios, como válvulas, codos, etc. [18]. Esta falta de información, lleva a realizar cálculos en donde el error cometido puede ser significativo.

En el proyecto de investigación realizado entre los años 1997 al 1999 [16], nos encontramos con este problema, por lo cual, se recurrió a buscar información en catálogos de Accesorios de Fabricantes Nacionales e Internacionales, comprobando que en pocos existe la información sobre dichos coeficientes de pérdidas, y cuando existe, la disparidad de valores dados por los distintos fabricantes para accesorios similares, es preocupante.

Como consecuencia de esto, se decidió, desarrollar un proyecto [17], con dos objetivos:

- Construir un equipo para determinar los coeficientes de pérdidas secundarias en diversos accesorios
- Determinar el coeficiente  $K$  de pérdidas secundarias, a modo de prueba, en un codo estándar de diámetro: 2" y en una válvula globo comercial del mismo diámetro.

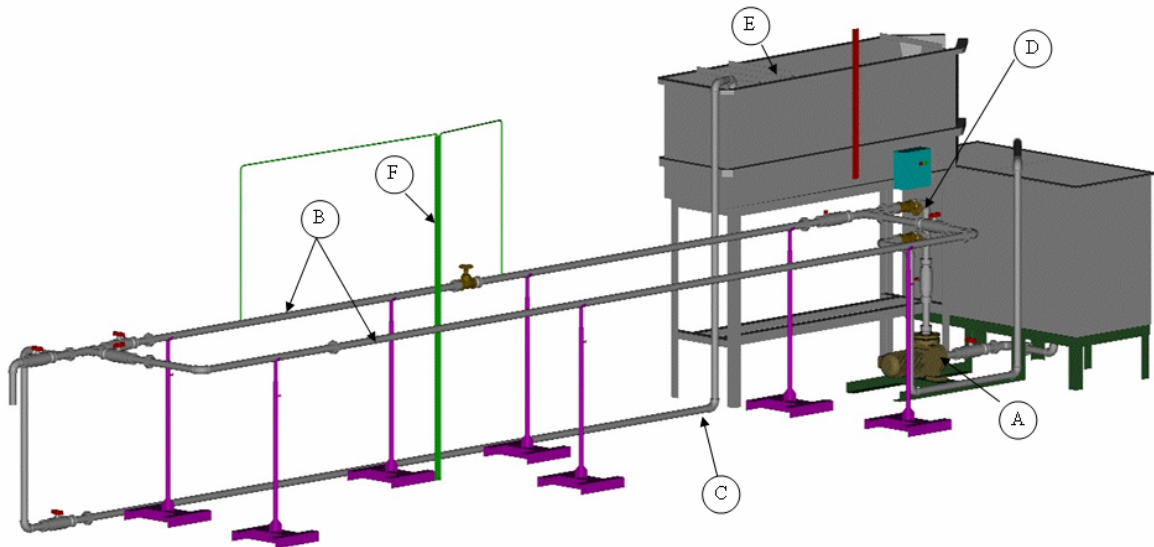
Como primer paso, se realizó la búsqueda de información en Internet y otros medios, tratando de establecer el estado del arte, sobre este tema.

Si bien existe mucha información referida al tema de accesorios hidráulicos, no encontramos información específica referida a nuestro problema.

En [18], se indica, como un problema muy frecuente, la falta de información sobre el coeficiente de pérdidas secundarias en accesorios hidráulicos.

Una vez constatada la falta de información al respecto, se diseñó y construyó el equipo [17] que permite realizar los ensayos, el cual, básicamente consta de los siguientes elementos (Fig. 1):

- a) Un sistema de bombeo que permite alcanzar velocidades de agua, hasta 5 m/s
- b) Dos circuitos de tubería, cerrados e independientes, con la longitud necesaria para que el flujo esté totalmente desarrollado
- c) Un circuito de retorno
- d) Cuadro de regulación de caudal, constituido por dos válvulas, una de ellas de retorno a depósito



- e) Un aforador diseñado y construido para cumplir con los parámetros hidráulicos (caudal y velocidad) del proyecto
- f) Un manómetro diferencial de Hg, para determinar las distintas variaciones de presión.

Se realizaron ensayos en accesorios hidráulicos y se obtuvieron resultados que difieren de lo indicado en catálogos y tratados específicos del tema en cuestión [3], [4], [8], [14], [15].

En función de estos resultados, y luego de un exhaustivo análisis de los mismos, y a los efectos de salvar la disparidad de resultados señalada, se propone un modelo matemático que se ha denominado “biparamétrico”.

Llegado a este punto, se realizó nuevamente una extensa búsqueda bibliográfica, a los efectos de constatar si existía algún antecedente referente a la utilización de modelos matemáticos, similares al propuesto, para el análisis, estudio y solución del problema de referencia. Dicha búsqueda resultó totalmente infructuosa, dado que no se pudo encontrar antecedente alguno.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En función de lo expuesto anteriormente y a los efectos de obtener los resultados deseados, se siguieron los siguientes pasos:

### 2.1. Cálculo de pérdidas primarias

Utilizando la ecuación general de pérdida de carga primaria, para determinar las pérdidas primarias o por fricción, tendremos [2], [5], [8], [11], [14]:

$$J_p = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

donde:

- $f$ : es el factor de fricción
- $D$ : diámetro de la tubería
- $L$ : longitud de la tubería

$V$ : velocidad del fluido  
 $g$ : aceleración de la gravedad.

## 2.2. Cálculo del factor de fricción

El factor de fricción se calcula según la fórmula universal de pérdida de carga en conductos industriales, [2], [5], [8], [11], [14]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \cdot \log \left( 2 \cdot \frac{K}{D} + \frac{18.7}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

## 2.3. Cálculo de pérdidas secundarias

Para calcular las pérdidas en accesorios utilizamos, la ecuación fundamental de las pérdidas secundarias, de uso universal, [2], [5], [8], [11], [14]:

$$J_s = K \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

donde:

$K$  = coeficiente de pérdidas del accesorio  
 $V$  = Velocidad del fluido  
 $g$  = Aceleración de la gravedad

Otra forma de calcular dichas pérdidas, es utilizando el concepto de Longitud equivalente ( $L_e$ ) [2], [5], [8], [10], [11], [14], el cual consiste en catalogar las pérdidas secundarias en base a la longitud de un trozo de tubería del mismo diámetro que produciría la misma pérdida de carga que en el accesorio en cuestión.

$$J_{P+S} = f \frac{\Sigma(L + L_e) V^2}{D \cdot 2g} \quad (4)$$

donde:

$f$ : es el factor de fricción  
 $D$ : diámetro de la tubería  
 $L$ : longitud de la tubería  
 $V$ : velocidad del fluido  
 $g$ : aceleración de la gravedad  
 $L_e$ : longitud equivalente del accesorio

## 2.4. Ensayos realizados

Utilizando el equipo para determinación de pérdidas secundarias [17], se realizaron cuatro ensayos, en una válvula globo  $f = 2''$ , de bronce con asiento del mismo material, cada uno de los cuales, para un grado distinto de apertura de la válvula a ensayar. En cada ensayo se realizaron cinco mediciones para un caudal o velocidad determinado. Estas mediciones se repitieron varias veces, a los efectos de disminuir los errores de lectura [1], [6], [9].

Posteriormente, y con el mismo criterio, se realizaron ensayos en un codo estándar de PVC y  $2''$  de diámetro.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para ejemplificar la dependencia del factor de fricción con la velocidad [4], [5], [8], [10], [14], se han calculado las pérdidas en 100 metros de 2 tipos de tubería de iguales dimensiones, una de ellas muy lisa ( $k/D = 0,00005$ ) y la otra muy rugosa ( $k/D = 0,005$ ), variando la velocidad de 0,5 a 2,5 m/s.

Los datos de las tuberías están indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de las tuberías.

Diámetro [m]	0,04500
Área [m <sup>2</sup> ]	0,00159
Long [m]	100,00
viscosidad [m <sup>2</sup> /s]	0,000001
<i>k/D</i> muy liso	0,000050
<i>k/D</i> muy rugoso	0,005000

Tabla 2. Resultados para tubería lisa.

<b>TUBERIA MUY LISA <i>K/d=0.00005</i></b>					
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>V<sup>2</sup></b>	<b>Re</b>	<b><i>f</i></b>	<b><math>\Delta P</math> (mmHg)</b>
0,50	0,0007950	0,250	22500	0,02529	54,245048
1,00	0,0015900	1,000	45000	0,02158	185,149568
1,50	0,0023850	2,250	67500	0,01979	382,031853
2,00	0,0031800	4,000	90000	0,01866	640,387569
2,50	0,0039750	6,250	112500	0,01786	957,707160

Tabla 3. Resultados para tubería rugosa.

<b>TUBERIA MUY RUGOSA <i>K/d=0.005</i></b>					
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>V<sup>2</sup></b>	<b>Re</b>	<b><i>f</i></b>	<b><math>\Delta P</math> (mmHg)</b>
0,50	0,0007950	0,250	22500	0,03407	73,077453
1,00	0,0015900	1,000	45000	0,03235	277,552758
1,50	0,0023850	2,250	67500	0,03172	612,332005
2,00	0,0031800	4,000	90000	0,03139	1077,265048
2,50	0,0039750	6,250	112500	0,03119	1672,502034

En la Tabla 2 se muestran los resultados para la tubería muy lisa y en la Tabla 3 para la muy rugosa.

En la Fig. 2 hemos representado los valores de *f* en función de la velocidad. Allí podemos apreciar que la dependencia de *f* con la velocidad es más fuerte para el tubo liso ( $f = 0,0217 \times v^{-0.2165}$ ) que para el tubo rugoso ( $f = 0,0326 \times v^{-0.0552}$ ).

En la Fig. 3 se han graficado las caídas de presión en función de la velocidad. Podemos observar que el exponente de la regresión es 1,7835 para el tubo liso y 1,9448 para el tubo rugoso.

Como ya se ha dicho, a los efectos de determinar las pérdidas secundarias y su relación con la velocidad, se realizaron ensayos en un codo de 90°,  $\phi = 2''$  y en una válvula globo,  $\phi = 2''$ .

En la válvula globo se realizaron mediciones para distintos grados de apertura y distintos caudales *Q*, es decir, distintas velocidades del fluido.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4 y 5.

Como conclusión de las Figuras 3, 4 y 5 se puede observar que las curvas obtenidas responden también a una ecuación del tipo:

$$\Delta P = mV^n \quad (5)$$

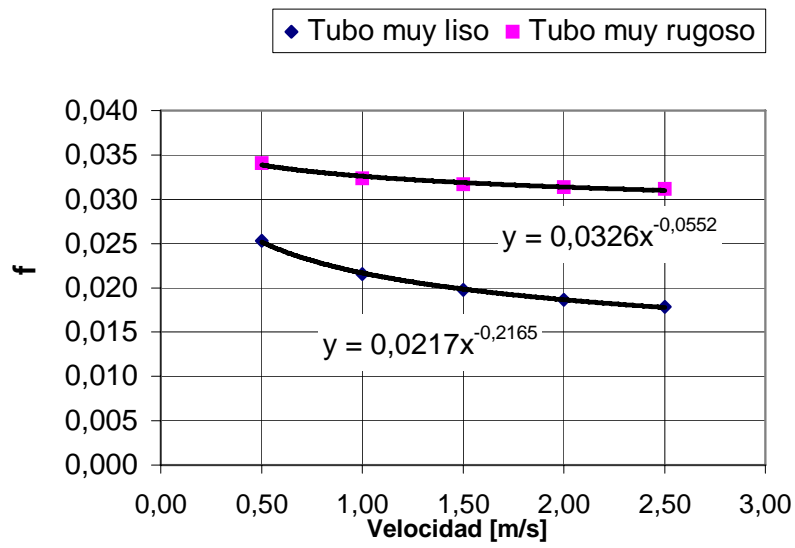


Fig. 2. Factor de fricción en función de la velocidad para tubería lisa y rugosa.

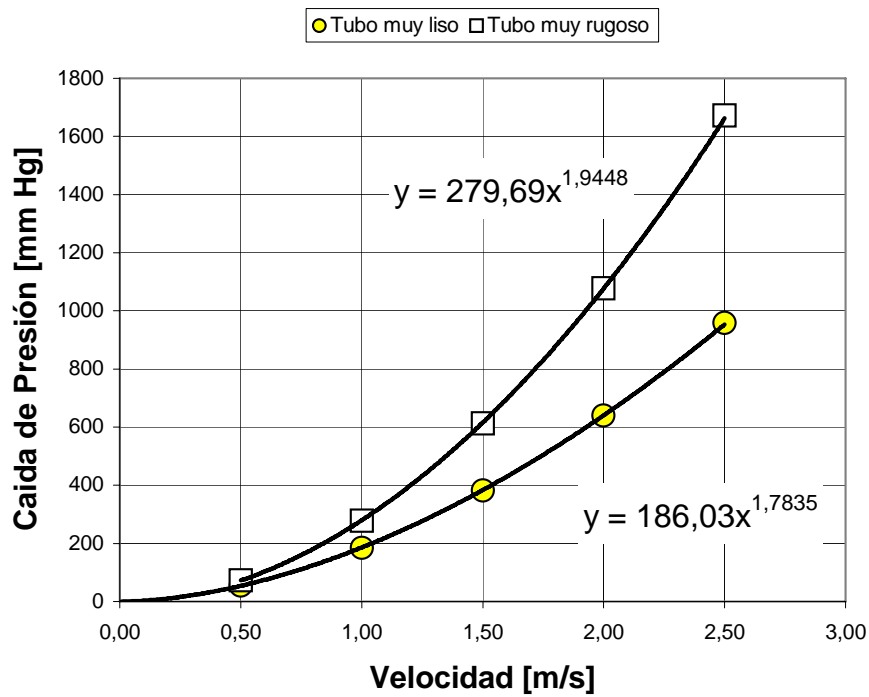


Fig. 3. Caída de presión en función de la velocidad para tubo muy liso y tubo muy rugoso.

siendo  $\Delta P$  la diferencia de presión. Por su parte, la constante  $m$  y el exponente  $n$  varían para cada curva trazada. El valor de  $n$  interesa particularmente, ya que se aparta del valor 2.0 que comúnmente, suele asumirse para los accesorios [4], [5], [8], [14], [15]. Así, por ejemplo,  $n = 1.69$  para el codo.

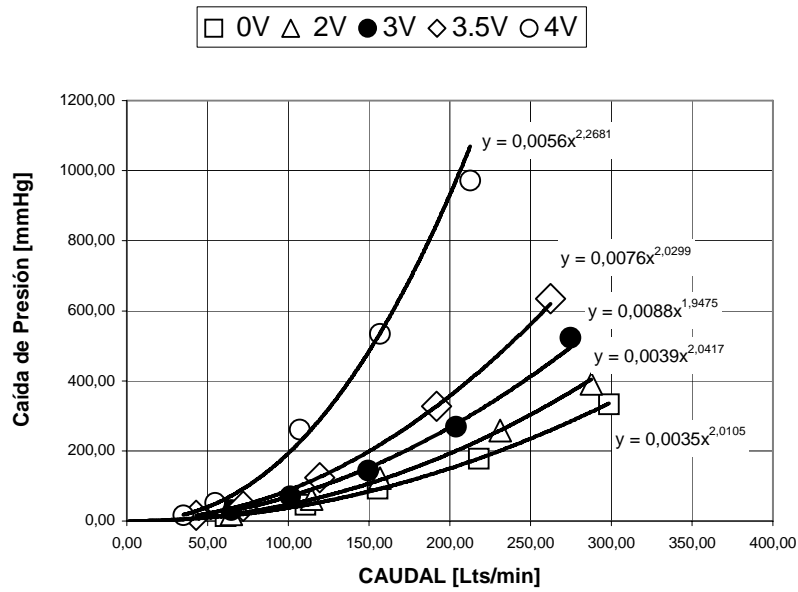


Fig.4. Caída de presión en función del caudal para una válvula globo de 2" con distintos grados de apertura medidos en vueltas desde la apertura máxima.

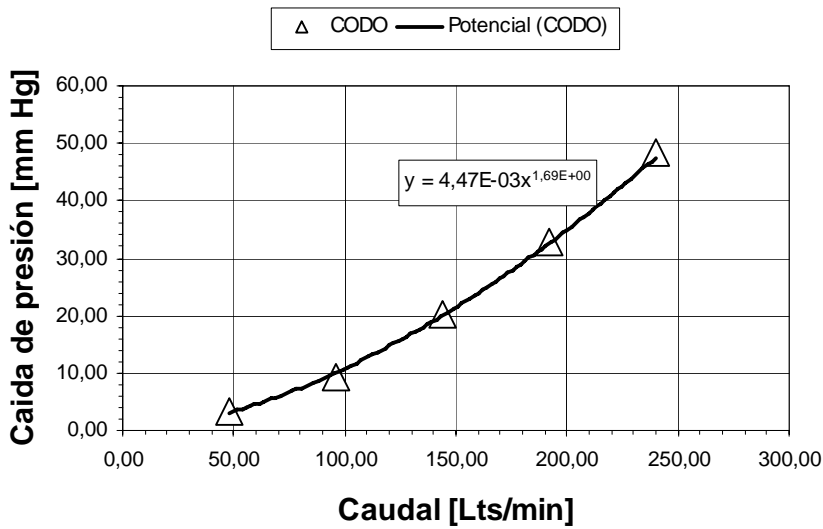


Fig. 5. Caída de presión en función del caudal para un codo de 2".

En realidad ninguna teoría física, salvo que se invoquen razones de carácter dimensional, sustenta la adopción del exponente 2.0, que ni siquiera se verifica para tuberías rectas, tal como se observa en la Fig. 3. Por otro lado no existe una necesidad de asumir el valor de dicho exponente, sino que resulta más lógico determinarlo a partir de los resultados de los ensayos.

Tabla 4. Válvula Globo, diámetro 2", cuatro vueltas cerrada (4V). Cálculos de coeficientes de pérdidas secundarias, de acuerdo a ensayo.

$Q$ Caudal (lt/min)	$D_p$ (mm Hg)	Constante	Exponente	$V$ Velocidad (m/seg.)	$K_u$ Coef. Pér.	$K_b$ Coef. Pér.
$x$	$y=m*x^n$	$m$	$n$	$V=Q*0,0104$	$K_u= D_p*2*g/g*V^2$	$K_b= D_p*2*g/g*V^n$
100	192,4810712	0,0056	2,2681	1,04	47,5471241	47,04978198
150	482,8148415	0,0056	2,2681	1,56	53,00713361	47,04978198
200	927,1588757	0,0056	2,2681	2,08	57,25723813	47,04978198
250	1537,997964	0,0056	2,2681	2,6	60,78717631	47,04978198

Tabla 5. Válvula Globo, diámetro 2", tres vueltas cerrada (3V). Cálculos de coeficientes de pérdidas secundarias, de acuerdo a ensayo.

$Q$ Caudal (lt/min)	$D_p$ (mm Hg)	Constante	Exponente	$V$ Velocidad (m/seg.)	$K_u$ Coef. Pér.	$K_b$ Coef. Pér.
$x$	$y=m*x^n$	$m$	$n$	$V=Q*0,0104$	$K_u= D_p*2*g/g*V^2$	$K_b= D_p*2*g/g*V^n$
100	69,10073585	0,0088	1,9475	1,04	17,06942528	17,10460893
150	152,202014	0,0088	1,9475	1,56	16,70990988	17,10460893
200	266,5253907	0,0088	1,9475	2,08	16,45943124	17,10460893
250	411,5957095	0,0088	1,9475	2,6	16,26773347	17,10460893

Tabla 6. Codo, diámetro 2". Cálculos de coeficientes de pérdidas secundarias, de acuerdo a ensayo.

$Q$ Caudal (lt/min)	$D_p$ (mm Hg)	Constante	Exponente	$V$ Velocidad (m/seg.)	$K_u$ Coef. Pér.	$K_b$ Coef. Pér.
$x$	$y=m*x^n$	$m$	$n$	$V=Q*0,0104$	$K_u= D_p*2*g/g*V^2$	$K_b= D_p*2*g/g*V^n$
100	10,72278315	0,00447	1,69	1,04	2,648766955	2,681168355
150	21,27657658	0,00447	1,69	1,56	2,335906523	2,681168355
200	34,59777865	0,00447	1,69	2,08	2,136606037	2,681168355
250	50,44593057	0,00447	1,69	2,6	1,993803468	2,681168355

Cualesquiera sean las ecuaciones utilizadas para evaluar las pérdidas secundarias, el  $\Delta P$  debe ser el mismo, entonces:

$$\Delta P = K_u \frac{V^2}{2g} = K_b \frac{V^n}{2g} \quad (6)$$

donde  $K_u$  es el coeficiente de dichas pérdidas expresadas en forma tradicional, mientras que  $K_b$  es el que se obtendría de ensayos (los cuales responden a una función potencial).

De la ecuación (6), se puede obtener la siguiente relación:

$$K_u = K_b V^{n-2} \quad (7)$$

Observamos que el coeficiente  $K_b$  coincide con  $K_u$  cuando  $n=2$ . Cuanto más difiera el exponente  $n$  del valor 2, más significativas serán las diferencias entre estos coeficientes y por consiguiente en el cálculo de las pérdidas secundarias. Además la ecuación (7) pone en evidencia que el coeficiente  $K_b$  no es adimensional.

De los cálculos realizados en base a los datos experimentales, que se muestran a continuación, Tablas 4, 5 y 6, deducimos que los valores del coeficiente de pérdidas  $K_u$  difieren para distintas velocidades y un mismo accesorio, por ejemplo, una válvula globo en un determinado grado de apertura. Contradictoriamente a lo que debería esperarse,  $K_u$  no se mantiene constante.

Lo que presenta la teoría física indicada en la bibliografía, es el cálculo de las pérdidas secundarias, utilizando, el coeficiente  $K_b$  y el exponente cuadrático ( $n=2$ ).

Debido a que el coeficiente de pérdidas secundarias  $K_b$  se obtiene de ensayos de laboratorio, y como hemos expresado, responde a una función potencial, si usamos el exponente cuadrático ( $n=2$ ) para realizar el cálculo de pérdidas secundarias o de forma, se cometerá un error significativo.

Para representar el fenómeno fluidodinámico en forma física real, debemos utilizar el modelo biparamétrico propuesto. Queda demostrado que se comete un error en los cálculos de pérdidas secundarias por el método tradicional, y por lo tanto, en la energía calculada para el funcionamiento de un determinado sistema hidráulico.

#### 4. CONCLUSIONES

Se han determinado las pérdidas en función de la velocidad en tuberías y accesorios para la conducción de fluidos, además se han graficado los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

Se han obtenido además, regresiones, a los efectos de determinar la ecuación que mejor representa los resultados de las mediciones, concluyéndose que ésta es una función potencial con exponente variable según el caso, y no el exponente 2,0, como indica habitualmente la teoría.

Se han obtenido también, regresiones para una tubería muy lisa ( $k/D=0,00005$ ) y una muy rugosa ( $k/D=0,005$ ), y se comprueba con los cálculos tradicionales, que tampoco allí se cumple la relación cuadrática entre las pérdidas y la velocidad.

Todo esto refuerza notablemente la razonabilidad y consistencia del modelo biparamétrico propuesto, que si bien implica un pequeño incremento de la complejidad matemática, representa de manera mucho más adecuada la pérdida de carga que se produce en los accesorios.

#### REFERENCIAS

- [1] Addison, H., *Hydraulics Measurement*, John Wiley and Sons, Nueva York (1946)
- [2] Alba Juez, F., *Mecánica de los Fluidos*, Ed. EFU (1996)
- [3] Czerweny, *Electrobombas*, Catálogo de Fabricante
- [4] Crane, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*, McGraw-Hill (1990)
- [5] Fox, R.W., Mc Donald, A., *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*, McGraw-Hill (1983)
- [6] Goldstein, R.J., *Fluid Mechanics Measurements*, Washington, D.C. Hemisphere (1983)
- [7] Lorm, C.F., Wolla, M.L., "Computer Analysis of Water. Distribution System: Part 1, Formulation of Equations", *Proceedings of the ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, **98**, HY2 (1972)
- [8] Mataix, C., *Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Ed. Labor (1994)
- [9] Miller, R., *Flow Measurement Engineering Handbook*, 2ª Ed. Nueva York, McGraw-Hill (1985)
- [10] Moody, L.F., "Friction Factors for Pipe Flow", *Transactions of the ASME*, **66**(8), 671-684 (1944)
- [11] Potter, M.C., Foss, J.F., *Fluid Mechanics*, Nueva York, Roland (1975)
- [12] Rouse, H., Ince, S., *History of Hydraulics*, Nueva York, Dover (1957)
- [13] Schulkes, R.M.S., Rinde, T., Utvik, O., "Pipe Flow with Radial Inflow: Experimental and Modeling Work", *Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering*, **121**(1), 106-111 (1999)
- [14] Streeter, V.L., *Mecánica de los fluidos*, McGraw-Hill (1987)



- [15] Greene, R.W., *Válvulas: Selección, uso y mantenimiento*, McGraw-Hill (1996)
- [16] Alba Juez, F., Sanchez, M., Fidalgo, R., Campos, D., Guevara, C., Informe Proyecto “Diseño y Simulación de Redes de Tuberías y Accesorios para el Transporte de Fluidos”, Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ – (1997–1999)
- [17] Alba Juez, F., Sanchez, M., Fidalgo, R., Campos, D., Guevara, C., Informe Proyecto “Análisis y Optimización de Accesorios para Redes de Tuberías”, Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería – UNSJ – (2000–2002)
- [18] Peña Peña, E., Montiel Gutierrez, M.A., Martinez Austria, P., “Análisis Hidráulico de Accesorios Utilizados en Sistemas de Riego a Baja Presión”, *IX Congreso Nacional de Irrigación*, México (1999)

### **BIPARAMETRIC MODEL FOR CHARACTERIZATION OF HYDRAULIC NETWORK ACCESSORIES**

**Abstract** – A research work is presented, in which the problem of secondary pressure losses in piping devices is investigated, together with the mathematical model which represents them. Different devices were tested and the results analyzed, concluding with the formulation of a new model to characterize them.

**Keywords** – Fluid mechanics, Pipes, Head losses.

