

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“PÉRDIDAS DE ENERGÍA LOCALES EN CRUCES DE REDES DE TUBERÍAS PARA DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE”

*Óscar Pozos Estrada (1), Óscar A. Fuentes Mariles 2 (2), Faustino de Luna Cruz (3),
Martín R. Jiménez Magaña (4), Eduardo A. Rodal Canales (5)*

(1) Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5623 3600, ext. 8626, opozose@iingen.unam.mx

(2) Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5623 3600, ofm@pumas.iingen.unam.mx

(3) Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5623 3600, flunac@iingen.unam.mx

(4) Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5623 3600, jimenezmartin@hotmail.com

(5) Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, México D.F., CP 04510, Tel. +52 55 5623 3600, erc@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

Una investigación experimental fue realizada con el propósito de obtener expresiones analíticas, para estimar las pérdidas locales generadas por los cruces de tuberías para el caso de entrada de flujo por dos tramos adyacentes. Se encontró una estrecha relación entre el cociente de los números de Reynolds de salida y entrada adyacentes (o de los flujos, por tratarse de tramos de igual diámetro), y las pérdidas locales que se producen en el flujo. Las ecuaciones encontradas pueden ser implementadas en un programa para el diseño de redes de tuberías. Además se presenta un ejemplo de aplicación en un cruce.

Palabras claves: Cruce de tuberías, Coeficiente de pérdida local, Redes de tuberías.

ABSTRACT

An experimental investigation was developed in order to obtain analytical expressions for estimating local head losses in crosses. This study was commissioned to determine K for a wide range of flow combinations in pipe crosses with different diameter pipes. It was found a close relationship between the ratio of the Reynolds numbers (flow into two perpendicular legs and out of two perpendicular legs) and local losses occurring in the crosses. The equations herein presented can be implemented in a program for the design of pipe networks. Further, an example problem illustrates how the equations can be used to obtain correct K values.

Key words: Pipe cross junction, Local loss coefficient, Pipe networks.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Investigador de la Coordinación de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT. Doctor en Ingeniería por la Universidad de Stuttgart, Alemania.

INTRODUCCIÓN

Investigaciones para obtener factores de pérdidas locales han sido realizadas desde la década de los 60's del siglo pasado. La razón del interés en este tema se debe al impacto que estos coeficientes pueden tener en el diseño y análisis de redes de tuberías, para la distribución de agua potable. Estos factores son comúnmente usados para calcular las pérdidas de energía en codos, tees, cruces, válvulas y otros accesorios.

Como resultado de las investigaciones previas, se han obtenido factores estándar para accesorios comunes. Sin embargo, un accesorio para el cual no se ha establecido adecuadamente un coeficiente de pérdida de energía es para los cruces de tuberías. Existe muy poca información acerca de pérdidas en cruces.

Esta situación tal vez se deba a la poca difusión que tales elementos tenían en el pasado, hecho que podía verse reflejado en la casi inexistente oferta de los mismos en el mercado. Sin embargo, en la actualidad, pueden encontrarse cruces de tuberías en una gran variedad de diámetros y materiales, tales como PVC, cobre, acero y hierro galvanizado, así como en materiales más modernos como el polietileno de alta densidad.

En todo cruce de tuberías pueden existir cuatro casos de flujo. El tipo 1 es el flujo perpendicular, este se presenta cuando el fluido entra y sale perpendicularmente a través de dos de los tramos. El tipo 2 es llamado flujo dividido, en este caso el flujo llega por uno de los cuatro tramos y sale por los tres restantes. En el tipo 3, el flujo es combinado, en este caso el flujo llega por tres de los tramos y sale por el único restante. El último caso es el tipo 4 nombrado flujo concurrente, ambas corrientes entran por dos de los tramos formando un ángulo de 180° y concurren en el centro del cruce, para posteriormente salir por los dos tramos restantes. Los tipos de flujo se muestran en la Figura 1.

Después de hacer una extensa revisión de varios libros de hidráulica y mecánica de fluidos, tales como Sotelo (1999), Mataix (1986), Roberson y Crowe (1991), Streeter et al. (1999), Saldarriaga (2004) e Idelchik (1986) entre otros, se pudo constatar que en todos ellos, existe algún apartado dedicado a las pérdidas locales en tuberías, que en algunos representa un capítulo y en otros tan sólo un breve inciso. Sin embargo, se hace muy poca referencia a las pérdidas en cruces. Por ejemplo, en el libro *Water Distribution Modeling* de Walski et al.

(2001) sólo se presentan un par de líneas dedicadas a los coeficientes de pérdidas en cruces. Además, la información presentada sería aplicable únicamente para el tipo 1, flujo dividido.

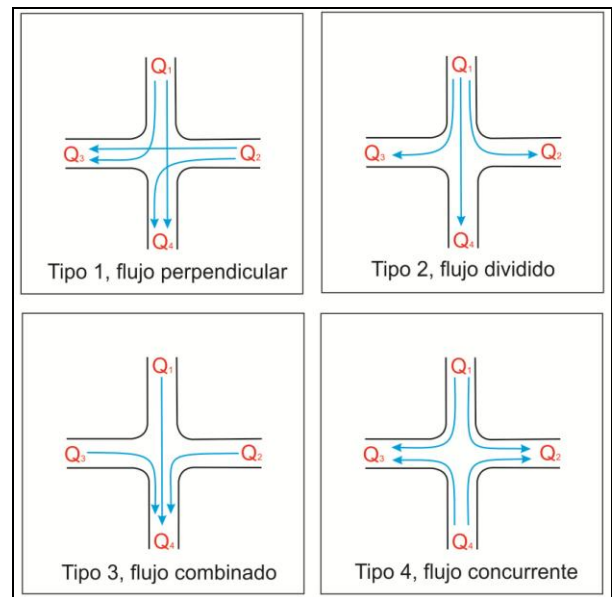


Figura 1. Tipos de flujo en cruces de tuberías.

En investigaciones realizadas por Daniel y Pelton (1959) y Christ (1966) se reportan pérdidas de energía negativas en el tramo central de algunas trifurcaciones. Por otra parte, Basara y Grogger (1999) construyeron un modelo a escala de una trifurcación real con el objetivo de cuantificar la caída de presión producida aguas abajo de la divergencia de los flujos, y compararlas con las estimadas mediante un modelo matemático basado en las ecuaciones de Navier-Stokes. Adicionalmente, estudiaron los efectos de la turbulencia en el sistema mediante varios modelos numéricos. Desafortunadamente, los autores no estimaron los valores de los coeficientes de pérdidas locales en el dispositivo.

Una década más tarde, Rao y Kumar (2009) estudiaron un tipo específico de trifurcación, con tramos divergentes a 0° , 90° y 120° con respecto al tramo alimentador, con el fin de comprobar experimentalmente lo reportado por Daniel y Pelton (1959) y Christ (1966). Ellos llegaron a la conclusión de que las pérdidas de carga negativas en el tramo central podían reducirse al incluir el coeficiente de Coriolis α en las ecuaciones del balance de energía. Para ello, estimaron experimentalmente los perfiles de velocidad en varios puntos de los tramos de la trifurcación. Adicionalmente, estimaron los coeficientes de pérdidas locales para varias condiciones de flujo,

reportándolas gráficamente en función de una relación de velocidades, la del tramo de interés y la del tramo alimentador, afectada por el seno del ángulo formado por los dos tramos. Es importante mencionar, que los autores despreciaron las pérdidas por fricción en la vecindad del accesorio, asumiendo que toda la pérdida de carga se debía a la presencia del mismo.

Asimismo, Sharp (2009) estudió un cruce de tuberías de acero de 15 cm de diámetro nominal, y obtuvo una serie de gráficas de las que pueden determinarse los coeficientes de pérdidas en función del gasto. Es importante mencionar, que el autor reporta diagramas para los cuatro casos de flujo que pueden presentarse en un cruce de tuberías, en función de los gastos de entrada y salida, los resultados se basaron en pruebas hechas en un modelo de diámetro fijo, por lo que no se sabe nada acerca de la pertinencia de aplicar los resultados en tuberías de diámetros diferentes. Este hecho es resaltado por el mismo autor en las conclusiones de su trabajo. Adicionalmente, no es claro por qué asigna tres coeficientes de pérdida para un accesorio que posee cuatro tramos, independientemente del caso de flujo que ocurra.

En el caso de los textos especializados en el tema de pérdidas locales, existen dos que son de consulta obligatoria. El primero es el Manual de flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, preparado por la división de ingeniería de Crane (1992), y el segundo es el Internal Flow Systems de Miller (1996).

El Manual de Crane, pese a ser una guía de diseño muy práctica y completa, con información detallada de ecuaciones, características de algunos fluidos y especificaciones acerca de materiales y accesorios en general, no dispone de información respecto a las pérdidas de energía en cruces, incluso tampoco en trifurcaciones.

Por otra parte, Miller (1996) dedica un capítulo completo a lo que denomina flujos combinados y divididos, para hacer referencia a aquellos accesorios que convierten varios flujos en uno solo, o dividen uno en diversas corrientes. Es el caso de las tees (3 tramos), yees (3 tramos con diversos ángulos), cruces (4 tramos) y estrellas (hasta 6 tramos). Es de resaltar, que el autor hace mayor énfasis en los accesorios con seis tramos que en los de cuatro. Para éstos últimos, reporta sólo dos gráficas para la estimación del coeficiente de pérdida.

Puede concluirse, que la poca información existente en cuanto a pérdidas en cruces de tuberías, está más enfocada al flujo dividido (tipo 2). Sin embargo, en cualquier red de distribución es factible que se presenten también cualquiera de los otros tres tipos. Por esta razón, es necesario investigar todos los tipos de flujos que ocurren en cruces de tuberías, utilizando tuberías de diferentes materiales y diámetros.

BASE CIENTÍFICO - TEÓRICA

La magnitud de las pérdidas ocasionadas por los accesorios colocados en las tuberías, y sobre todo las que se presentan en uniones de las redes de distribución de agua potable, pueden ser tan importantes como las debidas a la fricción (Fuentes y Rosales, 2004). Por ello, en los análisis de revisión, diseño, rehabilitación y operación de redes con muchas uniones de tuberías relativamente cortas, deben ser tomadas en cuenta.

Son numerosas las expresiones que permiten encontrar el valor de las pérdidas de energía h_p , también llamadas pérdidas de carga. Tales pérdidas son producidas por el rozamiento del fluido con la pared interna del tubo, conocidas como pérdidas de fricción h_f , más las generadas por accesorios y singularidades, conocidas como pérdidas locales h_L .

Las pérdidas locales se calculan comúnmente utilizando un coeficiente K .

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

En la ecuación (1), K es el coeficiente adimensional de pérdidas locales, V es la velocidad media del flujo en m/s, y g la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Por otra parte, las pérdidas por fricción h_f se evalúan usando un coeficiente de fricción f . La ecuación (2) es la muy conocida fórmula de Darcy-Weisbach.

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

Donde L es la longitud de la tubería en m y D es el diámetro interior del tubo en m.

Asimismo, con el planteamiento de ecuación de la energía, se pueden encontrar los coeficientes de pérdida para los cruces de tuberías.

$$E_1 = E_i + \sum h_f + \sum h_L \quad (3)$$

E_1 y E_i representan la energía en los puntos aguas arriba y aguas abajo del cruce, respectivamente.

Es bien sabido, que mucho se ha investigado sobre los accesorios más comunes: codos, curvas, tees, yees, cambios de sección, válvulas de todo tipo, entre otros tantos (Crane, 1992), pero es realmente poco lo que se ha reportado respecto a las pérdidas de energía en las uniones de tuberías, y en especial cuando se forman cruces (puntos en los que se unen cuatro tuberías).

El objetivo principal de este artículo es reportar algunos coeficientes de pérdidas locales en cruces de tuberías de varios diámetros pequeños y analizar la importancia de considerar los coeficientes en el cálculo de redes de tuberías.

METODOLOGÍA

Con el fin de encontrar los coeficientes de pérdidas locales para cruces de tuberías, se diseñó y construyó un dispositivo experimental versátil y práctico para realizar mediciones continuas, bajo diferentes condiciones de flujo, varios diámetros de tubería y que permite a su vez, el registro continuo de los datos pertinentes para la obtención de resultados.

Para garantizar la recirculación del agua, se configuró un sistema mixto de bombeo y descarga a gravedad. Una bomba de 2HP que toma el agua desde un cárcamo inferior de 2.10m x 1.50m de área y 0.70m de profundidad (2.20 m³ de volumen). El agua sube hasta dos tinacos de 400 litros de capacidad cada uno, ubicados a una altura de 3.40 m sobre el nivel del piso del laboratorio. Una vez que los tinacos están llenos, el agua desciende y circula por las tuberías de tal forma que al salir de ellas, puede redirigirse al cárcamo de bombeo. De esta forma, no se requerirían fuentes continuas de agua, y se descartarían posibles desperdicios del líquido. En la figura 2 se muestra un esquema del dispositivo experimental.

Se usan válvulas de esfera en las entradas y salidas para permitir la variación de los gastos y poder obtener múltiples puntos en las gráficas resultantes. Los medidores de flujo de turbina se ubican en las entradas y salidas de los cruces, para registrar los gastos que fluyen por de los mismos. Asimismo en cada uno de los brazos del cruce se colocaron sensores de presión, a una distancia mínima de diez

diámetros (10D) del centro de los cruces, para garantizar una medición sin perturbaciones.

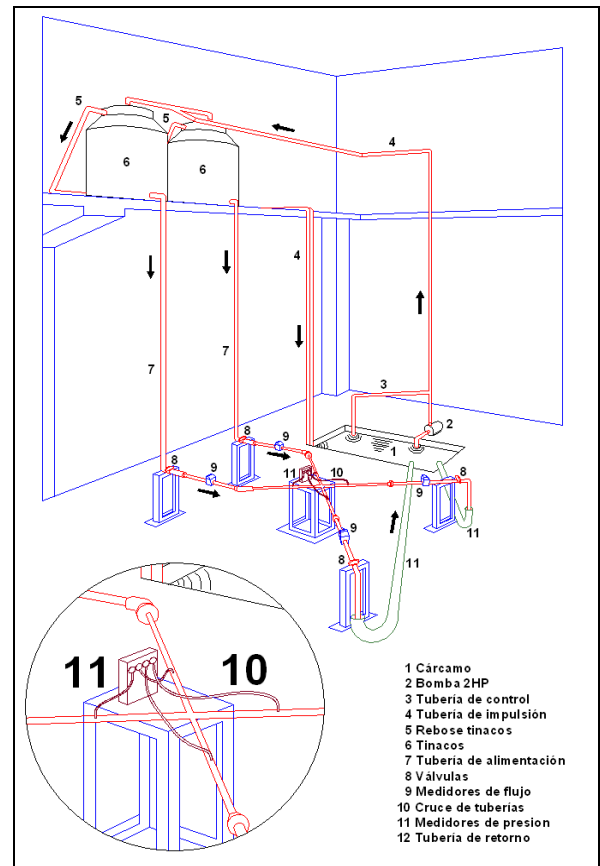


Figura 2. Dispositivo experimental.

Los sensores de presión se conectaron a un modulador que registra las señales en una tarjeta de adquisición de datos, para posteriormente almacenarlos en el disco duro de una computadora laptop.

En este trabajo se presenta el estudio del flujo perpendicular, que corresponde al tipo 1. Debido a que en investigaciones previas sobre cruces de tuberías no se han considerado diferentes diámetros para las pruebas, es importante considerar esta variable durante la investigación, con el fin de establecer su influencia en los coeficientes de pérdidas locales de los cruces. Por lo tanto, se considera apropiado utilizar diferentes diámetros para realizar las pruebas. Los diámetros nominales que se probaron fueron 13 mm, 19 mm, 25 mm para tuberías de PVC.

Con el propósito de tener suficientes datos experimentales, se considera necesario realizar un número mínimos de pruebas, para el tipo de flujo investigado, el número mínimo de pruebas realizado fue de entre 14 y 18.

Relacionado con el punto anterior, se definieron porcentajes de apertura de las válvulas ubicadas en cada uno de los cuatro tramos, con el fin de obtener de acuerdo al número de pruebas definido, un amplio grupo de combinaciones de gastos de entrada y de salida.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En el dispositivo experimental se registraron las cargas de presión y los gastos, agua arriba y aguas abajo del cruce, con el propósito de obtener los valores de los coeficientes de pérdidas K . Para tal fin se utilizaron una serie de expresiones de la forma:

$$K_{i \leftarrow 1} = \frac{(E_1 - E_i) - h_{f1} - h_{fi}}{V_i^2 / 2g} \quad (4)$$

Donde E_1 y E_i representan el nivel de energía en los puntos aguas arriba y aguas abajo del cruce, respectivamente. $h_{f1} - h_{fi}$ son las pérdidas por fricción en el tramo comprendido entre los puntos 1 e i , $V_i^2/2g$ es la carga de velocidad aguas abajo del cruce. El subíndice $i \leftarrow 1$, indica que se trata del coeficiente de pérdidas del tramo i , calculado a partir del balance de energía con el tramo 1.

Relación de los coeficientes K_i con R

El parámetro inicial y obvio a relacionar correspondía al número de Reynolds (R). Primero se graficaron K_3 y K_4 , contra sus respectivos R_3 y R_4 , para cada diámetro estudiado, y aunque se detectó cierta tendencia de la nube de puntos, se consideró conveniente relacionar además cada coeficiente con, por lo menos, un parámetro de alguna de las dos entradas, ya que un R de una de las salidas, podría provenir de múltiples combinaciones de R de las dos alimentaciones.

En las Figuras 3 a 8, se reportan estas gráficas, en las que se ha trazado una línea indicando la tendencia de los datos experimentales. En ellas se relaciona K_3 contra la relación R_3/R_1 , y K_4 contra R_4/R_2 . Nótese que en ambos cocientes, se relaciona el R de cada entrada con el de la salida perpendicular a ella.

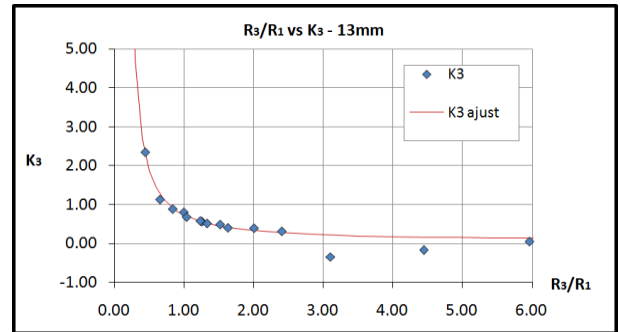


Figura 3. Gráficas de R_3/R_1 contra K_3 para el cruce de 13 mm.

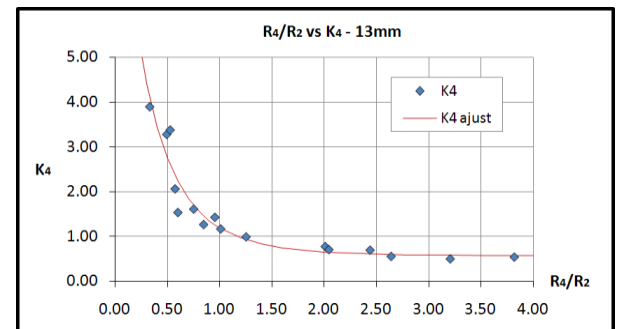


Figura 4. Gráficas de R_4/R_2 contra K_4 para el cruce de 13 mm.

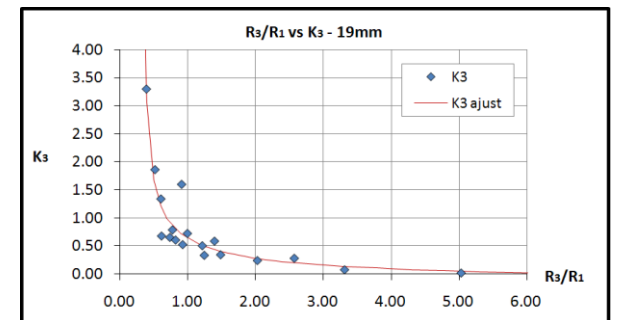


Figura 5. Gráficas de R_3/R_1 contra K_3 para el cruce de 19 mm.

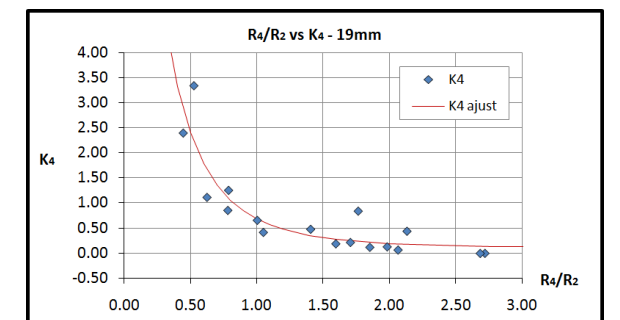


Figura 6. Gráficas de R_4/R_2 contra K_4 para el cruce de 19 mm.

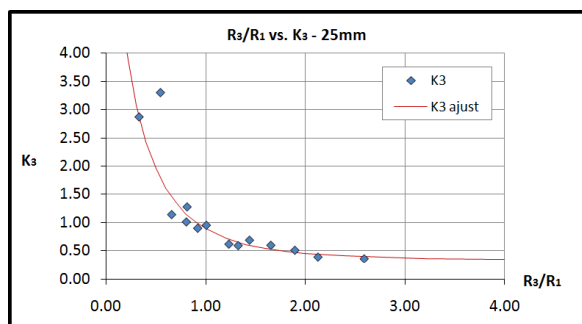


Figura 7. Gráficas de R_3/R_1 contra K_3 para el cruce de 25 mm.

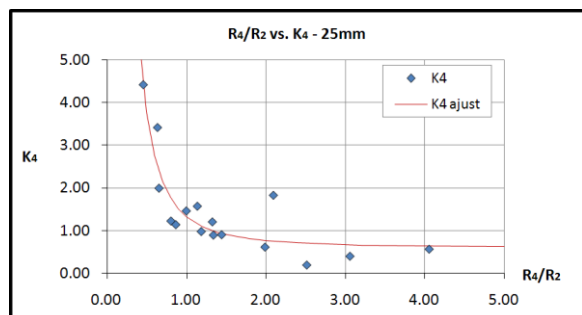


Figura 8. Gráficas de R_4/R_2 contra K_4 para el cruce de 25 mm.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aún cuando la relación individual de los R_i con los K_i , fuera independiente de las posibles combinaciones de entrada, se encontró que al hacer una relación entre un R de salida, con uno de entrada, y graficarla contra los coeficientes de pérdidas, la nube de puntos mejora su tendencia.

Las líneas de tendencia mostradas en todas las figuras anteriores, corresponden a las curvas de mejor ajuste, de entre varios tipos analizados. Por la tendencia general de los puntos, era necesario considerar curvas que tuvieran las siguientes características: asintótica al eje de las ordenadas, monótona decreciente, cóncava hacia arriba y asintótica a alguna recta paralela al eje de las abscisas. Se ajustaron entonces funciones exponenciales negativas y potenciales inversas de varios tipos, siendo en todos los casos las segundas, las que presentaron mejores resultados. El parámetro empleado para evaluar la calidad de los ajustes fue el coeficiente de determinación CD^2 , encontrado en cada proceso. La forma general de las funciones con mejor ajuste presentaba la siguiente forma:

$$K_{ajust} = \frac{a}{\left(\frac{R_{sal}}{R_{ent}} + b\right)^c} + d \quad (5)$$

Donde los coeficientes a , b , c y d , representan los parámetros a estimar mediante el proceso de ajuste.

Las ecuaciones 6 y 7 sirven para obtener los coeficientes de pérdida K_3 ($CD^2 = 1.0$) y K_4 ($CD^2 = 0.91$). Las expresiones corresponden a las figuras 3 y 4, para el diámetro de 13 mm.

$$K_{3ajust} = \frac{0.56}{\left(\frac{R_3}{R_1} - 0.15\right)^{1.14}} - 0.06 \quad (6)$$

$$K_{4ajust} = \frac{22.22}{\left(\frac{R_4}{R_2} + 1.17\right)^{4.53}} + 0.53 \quad (7)$$

Por otra parte, con las ecuaciones 8 y 9 se obtienen los coeficientes K_3 ($CD^2 = 0.87$) y K_4 ($CD^2 = 0.81$). Las expresiones corresponden a las curvas de tendencia de las figuras 5 y 6, para el diámetro de 19 mm.

$$K_{3ajust} = \frac{0.70}{\left(\frac{R_3}{R_1} - 0.34\right)^{0.56}} - 0.24 \quad (8)$$

$$K_{4ajust} = \frac{7.82}{\left(\frac{R_4}{R_2} + 0.83\right)^{4.31}} + 0.10 \quad (9)$$

Finalmente, las ecuaciones 10 y 11 son útiles para evaluar los coeficientes de pérdida K_3 ($CD^2 = 0.77$) y K_4 ($CD^2 = 0.82$). Las expresiones corresponden a las figuras 7 y 8, para el diámetro de 25 mm.

$$K_{3ajust} = \frac{10.33}{\left(\frac{R_3}{R_1} - 1.10\right)^{3.93}} - 0.33 \quad (10)$$

$$K_{4ajust} = \frac{0.73}{\left(\frac{R_4}{R_2} + 0.83\right)^{4.31}} + 0.60 \quad (11)$$

En este punto es bueno aclarar un punto importante, nótese que en la Figura 3, existen un par de puntos por debajo del eje principal de las abscisas, lo que implicaría valores negativos de los coeficientes de

pérdidas locales K . Aunque esto podría representar una contradicción, pues lejos de representar una pérdida, estaría indicando una ganancia de energía, no puede dejarse de lado el hecho de que estos valores provienen de mediciones de laboratorio y que, por lo tanto, están sujetos a errores. Se puede especular, por ahora, que estos puntos negativos pudieron estar afectados, por algún error cometido durante el proceso de medición, por ejemplo alguna perturbación externa sobre los sensores de presión, un error en la lectura de los gastos de alguno ó algunos de los medidores de flujo, entre otras posibles fallas.

Los valores de CD^2 , bastante cercanos a la unidad, soportan la afirmación hecha previamente, de que existe una tendencia clara de los puntos y que, los valores de los coeficientes de pérdidas locales K_i , son bien explicados por las relaciones ($R_{salida}/R_{entrada}$).

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Con el propósito de mostrar el procedimiento sugerido para el cálculo de las pérdidas locales ocasionadas por cruces de tuberías, mediante el uso de las ecuaciones presentadas en este artículo, se presenta un ejemplo de aplicación.

A dos lados adyacentes de un cruce de tuberías de PVC con un diámetro de $D = 13 \text{ mm}$, llegan dos tuberías de 4.0 m de longitud, que transportan gastos de 0.416 l/s y 0.277 l/s. Los dos tubos de salida tienen longitudes de 3.5 m y 3.0 m. De tal forma que el 76% del total del gasto fluye a través del tramo más largo, ubicado perpendicularmente al que abastece 0.416 l/s. El esquema se observa en la Figura 9.

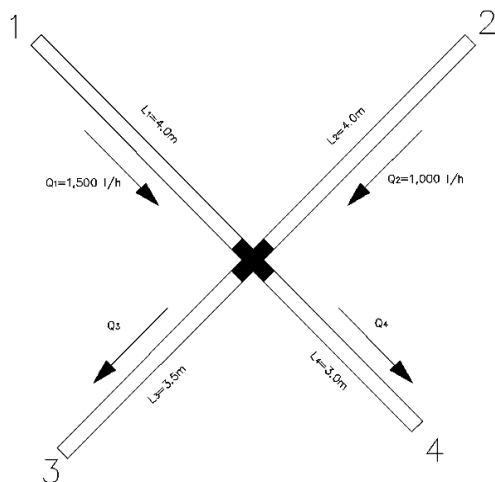


Figura 9. Cruces de tuberías del ejemplo.

Se pretende estimar los coeficientes de pérdidas locales de carga en los dos tramos de salida 3 y 4, debidas a la presencia del cruce, usando las ecuaciones para K_3 y K_4 para cruces de tuberías de 13 mm.

El gasto total Q_T que llega al cruce a través de los tramos 1 y 2 es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = 0.416 \text{ l/s} + 0.277 \text{ l/s} = 0.693 \text{ l/s}$$

De modo que los gastos de salida del cruce, correspondientes a los tramos 3 y 4, son:

$$Q_3 = 0.76 * Q_T = 0.527 \text{ l/s}$$

$$Q_4 = Q_T - Q_3 = 0.166 \text{ l/s}$$

Las relaciones requeridas para el uso de las expresiones son las siguientes:

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{0.527}{0.416} = 1.27$$

$$\frac{R_4}{R_2} = \frac{Q_4}{Q_2} = \frac{0.166}{0.277} = 0.60$$

Usando las ecuaciones (6) y (7) para obtener los coeficientes de pérdidas locales K_3 y K_4 , se tiene:

$$K_{3ajust} = \frac{0.56}{(1.27 - 0.15)^{1.14}} - 0.06 = 0.43$$

$$K_{4ajust} = \frac{22.22}{(0.6 + 1.17)^{4.53}} + 0.53 = 2.20$$

Finalmente, y para hacer énfasis en la importancia de estimar las pérdidas locales en algunos tipos de redes, se compararon éstas con las pérdidas de fricción de las dos tuberías de salida. En la tabla 1 se presentan las pérdidas por fricción para cada tramo del cruce de tuberías.

Tabla 1. Pérdidas por fricción para cada tramo del cruce de tuberías.

Tubería	L(m)	Q (l/h)	R	h_f (m)
1	4.0	0.416	30,246	0.47
2	4.0	0.277	20,164	0.35
3	3.5	0.527	38,312	0.50
4	3.0	0.166	12,098	0.18

La comparación de pérdidas locales y de fricción se incluye en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación entre las pérdidas por fricción y locales para las tuberías de salida.

Tubería	K	h_k (m)	h_f (m)	h_k/h_f
3	4.0	0.07	0.50	13%
4	4.0	0.08	0.18	42%

Como puede observarse, en el caso de la tubería 4, las pérdidas locales son del orden del 42% de las pérdidas de fricción, y aunque podría pensarse que su valor neto es muy pequeño para presentar algún problema, debe tenerse en cuenta que pueden existir varios cruces de estos en la red, y su efecto combinado podría llegar a perjudicar el buen funcionamiento de la red.

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto en este trabajo, se llevaron a cabo pruebas experimentales para determinar de los coeficientes de pérdidas en cruces en una red de tuberías con características geométricas conocidas, cabe mencionar las siguientes aclaraciones:

Para los estudios se emplearon tres cruces de tubería, de PVC de diámetros interiores de 13 mm, 19 mm y 25 mm.

Cada cruce estaba compuesto por cuatro tramos perpendiculares de igual diámetro. En ningún momento se emplearon cruces con diámetros combinados.

El dispositivo experimental tenía la posibilidad de variar los gastos de entrada y de salida de los cruces, de tal forma que los flujos generados estuvieron dentro de un intervalo del número de Reynolds comprendido entre 4,000 y 40,000.

Las pérdidas por fricción en la vecindad del cruce no fueron despreciadas, y se estimaron mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

Adicionalmente a estas aclaraciones, es bueno mencionar que los coeficientes de pérdidas locales, K , calculados en la forma indicada en el ejemplo de aplicación y reportados en forma de ecuaciones, partieron de la suposición de un coeficiente K por cada tramo de salida de los cruces. Entonces, para el caso de flujo perpendicular se estimaron dos coeficientes K_3 y K_4 .

El enfoque adoptado (una K por cada salida) y que puede observarse en las gráficas de dispersión

presentadas en las figuras 3 a 8. Pese a que las gráficas indican una tendencia que muestra una disminución del valor del coeficiente de pérdida a medida que aumenta R , para luego estabilizarse en un valor constante, sería muy arriesgado concluir que esto siempre suceda así. Si bien, los puntos de la gráfica indican dicha tendencia, presentan una dispersión que no puede desestimarse; además, el máximo número de Reynolds considerado, no fue superior a 40,000, por lo que predecir el comportamiento más allá de este número sería un poco especulativo.

Sin embargo, al usar la relación del número de Reynolds a la entrada y a la salida del cruce R_{sal}/R_{ent} , en lugar de sólo el número de Reynolds a la salida, como variable dependiente, se evidenciaba que la dispersión de los datos disminuía, por lo menos para los diámetros estudiados.

Para este estudio en particular, se descubrieron relaciones interesantes entre los coeficientes de pérdidas menores K , de las dos salidas, con las proporciones obtenidas al dividir el R respectivo, por el de su entrada ortogonal. En las gráficas, se observaba una clara tendencia que se conservaba de un diámetro a otro, y que indicaba que K , que era grande para relaciones (R_{sal}/R_{ent}) pequeñas, disminuía y tendía a volverse constante para valores aproximadamente superiores a 2.0, es decir, para cuando el gasto de salida era superior, por lo menos en 2.0 veces, al gasto de su entrada ortogonal.

Basados en las gráficas (Figuras 3 a 8), se estimaron ecuaciones que permitieran el cálculo directo del coeficiente K , de acuerdo a las relaciones de flujo entre salida y entrada, para cada diámetro y para cada uno de los coeficientes K_3 y K_4 .

Finalmente, para futuras investigaciones podrían considerarse cruces de tuberías de materiales diferentes al PVC, sería interesante ver la influencia del material en las relaciones encontradas. De igual forma, quedaría pendiente el análisis de los tres tipos de flujo restantes. Además, podría verificarse si las expresiones encontradas siguen siendo válidas para relaciones de Reynolds mayores a las máximas obtenidas en este trabajo. Incluso, probarlas para datos tomados con números de Reynolds mayores a los usados.

BIBLIOGRAFÍA

Basara, B. and Grogger, H.A. (1999). "Experimental and numerical study of the flow through a trifurcation". Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, Austria.

- Christ, A. (1966). "Research on head losses in Escher-Wyes type distribution pipes". Escher-Wyes News: 39, pp. 36-42.
- CRANE (1992). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. División de ingeniería de CRANE, México, McGraw Hill.
- Daniel, C.M. and Pelton, H.A. (1959). "Pressure losses in hydraulic branch-off fittings". Product Engineering: 30 (29), pp. 60-61.
- Fuentes Mariles, O.A. y Rosales Plascencia, I.L. (2004). "Estimación de pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable". Ingeniería Hidráulica en México: XIX, N° 1, pp. 65-73.
- Idelchik, I.E. (1986). Handbook of hydraulic resistance, second edition, Springer-Verlag.
- Mataix, C. (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2a edición, Madrid, Ediciones del Castillo.
- Miller, D.S. (1996). Internal flow systems, 2da Ed., Cranfield, BHR Group Limited., U.K.
- Rao, A.R and Kumar, B. (2009). "Energy losses at pipe trifurcations". Urban Water Journal: 6(4), pp. 333-340.
- Roberson, J.A. y Crowe, C.T. (1991). Mecánica de Fluidos, 2ª edición, Mc Graw Hill.
- Saldarriaga J. G. (2004). Hidráulica de tuberías, Alfaomega.
- Sharp, Z.B. (2009). Energy losses in cross junctions, Master Thesis, Utah State University, Utah, U.S.A.
- Sotelo, G. (1999). Hidráulica General, Volumen 1, México, Noriega Editores.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B. and Bedford, K.W. (1999). Mecánica de fluidos, novena edición, Mc Graw-Hill.
- Walski, T.M., Chase, D.V. y Savic, D.A. (2001). Water Distribution Modeling, 1st Ed., Waterbury, Haestad Press, U.S.A.