



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**CUANTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS
LOCALES EN REDES DE AGUA POTABLE**

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Joana Berenice Luna Alonso

DIRECTOR:

Dr. Oscar A. Fuentes Mariles



Edo. De México, México

2015

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: M. en C. Luis Pomposo Vigueras Muñoz.

Vocal: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles.

Secretario: M. en I. Martín Ortiz León.

Suplente: M. en I. Mario Sosa Rodríguez.

Suplente: M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña.

Lugar donde se realizó la tesis:

Área de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM



AGRADECIMIENTOS

“Hay una fuerza motriz más
poderosa que el vapor, la
electricidad y la energía
atómica: la voluntad”
Albert Einstein

He llegado a este momento en mi vida en el cual puedo mirar todo el recorrido por el que caminé y estar más que satisfecha, afortunadamente nunca estuve sola y justo a esas personas que me brindaron su apoyo incondicional en muchos aspectos quiero dedicarles este trabajo de tesis y agradecerles sinceramente por ser parte de esta aventura que comenzó hace varios años ya.

Primeramente quiero agradecerle a Dios porque me permitió cumplir una meta más, porque sé que sin él difícilmente podría haberlo logrado. A mi familia por su apoyo, cariño y por motivarme a seguir adelante; gracias a mis padres Patricia y Efraín, que siempre me apoyaron en todos los aspectos posibles, por la educación que me brindaron que hoy me permite ser la persona que soy, por su incansable esfuerzo digno de toda mi admiración. A mis hermanos por toda su ayuda, consejos, risas y por tolerar muchas circunstancias: a Elda por su comprensión, a Daniel por su compañía. A mí cuñada Yesi y mi pequeño sobrino Jank por llenarme de ánimo. A mi esposo Guillermo porque desde que lo conocí ha sido todo un ejemplo para mí, por todo el amor, apoyo, ayuda y ánimo que me da día a día. A mis suegros la Dra. Ana Silva y el Dr. Eduardo Vega, que sin su apoyo y confianza esto no hubiera sido posible, a mí cuñada Rosario por darnos ánimo cuando el estrés era grande.

También quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de estudiar en la preparatoria No. 3 Justo Sierra y posteriormente me dio un lugar en la Facultad de Estudios Superiores Aragón para poder estudiar una maravillosa carrera: Ingeniería Civil. A lo largo del tiempo en la FES Aragón conocí grandes ingenieros. Así que quiero agradecer a algunos de ellos; a él M. en C. Luis Pomposo Viguera Muñoz (mi tutor) quien con sus conocimientos en las clases y apoyo

académico me motivo a enfocarme en el área de Hidráulica, al M. en I. Martín León Ortiz por sus buenas enseñanzas, al M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña por su contribución en mi formación académica. A todos esos profesores que han dejado una lección profesional y de vida.

Gracias al Instituto de Ingeniería de la UNAM por abrirme las puertas y apoyarme para realizar este trabajo. A mi asesor de tesis: el Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles por su dedicación, consejos, paciencia, tiempo y sin dejar a un lado su excelente ejemplo como profesionista y como persona.

Por último y no por ello menos importante quisiera agradecer a todos mis amigos, a Oli por su grata y divertida compañía (mi cómplice), a Bere por sus consejos y por su amistad (ya son bastantes años de conocernos), a Arturo por animarme cuando andaba cabizbaja y estresada, a Soni por brindarme su amistad y por esas pláticas entretenidas. A todos esos amigos y compañeros que en algún momento se cruzaron en mi camino trayéndome un montón de experiencias buenas y malas más buenas que malas sin duda, gracias por todas esas risas compartidas.

ÍNDICE.

1. Introducción	7
2. Las pérdidas de energía por fricción en conductos cerrados.....	9
2.1 Definición y clasificación del flujo.	9
2.2 Ecuación de Darcy-Weisbach.	13
2.3 Ecuación de Manning.	18
2.4 Ecuación de Hazen-Williams.....	20
3. Las pérdidas locales en conductos a presión.....	22
3.1 Descripción general de lo que son las pérdidas locales.....	22
3.2 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “T” y cruz.....	26
3.2.1 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “T”.....	26
3.2.2 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “cruz”.	30
3.3 Apéndice.	62
4. Las pérdidas locales en redes de tuberías de agua potable.....	83
4.1 Principales componentes de una red de agua potable.....	83
4.2 Clasificaciones de una red de agua potable.	85
4.3 Consideraciones del funcionamiento de una red de agua potable.	85
4.3.1 Conservación de la masa (Ecuación de continuidad).....	86
4.3.2 Conservación de la energía.	86
4.3.3 Conservación de la cantidad de movimiento.....	88
4.4 Planteamiento del cálculo de una red de agua potable.....	89
4.4.1 Pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable.....	92
4.4.1 Pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable.....	92
5. Método de cálculo de redes de tuberías a presión.....	107
5.1 Método de Sánchez-Fuentes.	107
5.2 Aplicación del método Sánchez y Fuentes para una red de tuberías de agua potable.	110

6. Ejemplos de aplicación de cálculo de redes a presión con y sin pérdidas locales.....	121
6.1 Datos de la red a presión y planteamiento del sistema de ecuaciones para su resolución.....	121
6.2 Red de tuberías a presión sin pérdidas locales.....	123
6.3 Red de tuberías a presión con pérdidas locales.....	134
6.4 Comparativa de una red con y sin pérdidas locales.....	144
7. Conclusiones.....	149
8. Bibliografía.....	151

1. Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida, por tal razón, en el pasado las civilizaciones buscaban establecerse cerca de los ríos para abastecerse de agua; sin embargo, conforme comenzaron a haber avances se desarrollaron técnicamente, el hombre comenzó a transportar y almacenar el agua, con ello los asentamientos humanos se ubicaron en zonas más alejadas de los sitios donde estaba disponible este líquido.

En la actualidad, el uso del agua es muy diverso; se emplea en actividades domésticas, industriales, agrícolas, de navegación, de generación de energía eléctrica, entre otras.

Una de las maneras de transportar el agua de un punto a otro consiste en impulsarla a través de tuberías (usualmente de sección circular, esto debido a su mayor eficiencia). El flujo de un fluido en conductos viene acompañado de una disminución de energía, porque en el recorrido del líquido, una parte de ella se transforma en otra que no se recupera, que se conoce como pérdida de energía, misma que al expresarla por unidad de peso, se le llama pérdida de carga de presión. Esta pérdida de carga se suele dividir en dos partes, las pérdidas por fricción y las pérdidas locales. A menudo se les denominan pérdidas mayores y pérdidas menores, respectivamente; en muchos casos, es muy importante considerar ambas en el diseño de una red de flujo a presión, incluso cuando las longitudes de las tuberías son cortas, las pérdidas locales llegan a cobrar mayor importancia que las de fricción. Algunos ejemplos de lo anterior, son las tomas domiciliarias, los sistemas de riego por goteo y las redes de agua pequeñas; que contienen una gran cantidad de accesorios, ramificaciones, válvulas y cambios de alineamiento de las conducciones.

Actualmente se cuenta con una gran cantidad de información sobre estos accesorios y piezas especiales, se pueden encontrar *coeficientes de pérdidas locales* para diversos accesorios con mayor o menor precisión dependiendo del material consultado. En las últimas décadas ha habido un interés en un grupo de accesorios de redes de tuberías, es el grupo al que pertenecen los elementos en los cuales convergen o divergen dos o más flujos. Como lo son las uniones tipo cruz y las tipo "T". En esta tesis se consideran los valores obtenidos de las relaciones y gráficas incluidas en trabajos de investigación sobre esta clase de uniones como las del M. en I. Patiño (2011), M. en I. Basurto (2014) y M. en

I. Hurtado (2013) con respecto a este tipo de accesorios y otras disponibles en la literatura técnica.

En el segundo capítulo se presentan los fundamentos que explican el comportamiento de un fluido en un conducto a presión, así como las ecuaciones para el cálculo de pérdidas de energía por fricción en tuberías.

El tema de las pérdidas locales se aborda en el capítulo 3, se explica cómo es que se originan, así como la importancia y criterio de tomar en cuenta dichas pérdidas. Se describe las pérdidas locales originadas por uniones tipo “T” y tipo cruz, se incluyen las ecuaciones propuestas por algunos autores. Al final del capítulo se agrega un anexo con una serie de tablas y gráficas con los coeficientes de pérdidas locales de los accesorios más comunes. En el capítulo 4 se explica brevemente lo que es una red de tuberías de agua potable y sus características, también se plantea la manera de calcular una red de tuberías.

Uno de los métodos de calcular una red de tuberías de agua potable es el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Sánchez y Fuentes, 1991], por lo cual en el capítulo 5 se presentan sus parámetros de cálculo y para finalizar dicho capítulo se muestra un ejemplo en donde se utiliza el método.

En el capítulo 6 se incluyen algunos ejemplos de aplicación del cálculo de una red a presión con y sin pérdidas locales. Para efectos de comparación, se modela la red con el paquete Epanet.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta tesis.

2. Las pérdidas de energía por fricción en conductos cerrados

En el presente capítulo se presentaran los fundamentos principales que explican el comportamiento de un fluido en un conducto cerrado cuando este ocupa todo el espacio. Se incluyen definiciones, parámetros involucrados así como las principales ecuaciones y modelos, tanto matemáticos como empíricos para el cálculo de pérdidas de energía por fricción en tuberías.

Las pérdidas por energía en conductos cerrados ocupados totalmente por el fluido suelen dividirse en dos grupos; las pérdidas que se producen por el contacto entre el fluido y la superficie interna de la tubería, también conocidas como pérdidas longitudinales o pérdidas por fricción (h_f) y aquellas que son originadas por elementos o piezas especiales localizados en una cierta parte de la tubería, llamadas pérdidas locales o menores (h_L).

2.1 Definición y clasificación del flujo.

De acuerdo con el aspecto físico que tiene en la naturaleza, la materia se clasifica en tres estados: sólido, líquido y gaseoso, de los cuales los dos últimos se conocen como fluidos. A diferencia de los sólidos, por su constitución en los fluidos sus moléculas cambian continuamente las posiciones relativas, sin ofrecer gran resistencia al desplazamiento entre ellas, aun cuando este sea muy grande. Además, para el fluido en reposo en su interior no existen fuerzas tangenciales a superficie alguna, cualquiera que sea su orientación, y que dichas fuerzas se presentan solo cuando el fluido esta en movimiento [Sotelo, 1991].

En un fluido no puede resistir esfuerzo cortante, si este se presenta, el fluido se deforma continuamente. En este proceso, las moléculas del fluido cambian de posición relativa permanentemente, a la vez que tienen un movimiento relativo con respecto a un contorno sólido que se conoce como flujo.

El flujo en cualquier tipo de ducto, se puede determinar mediante las siguientes cantidades físicas de las partículas de flujo:

- a) Desplazamiento

- b) Velocidad
- c) Aceleración

En general, las propiedades de un fluido y las características mecánicas del mismo serán diferentes de un punto a otro dentro de su campo; además, si las características en un punto determinado varían con el tiempo, el flujo es no permanente. Por el contrario, será un flujo permanente si las características en un punto son constantes para cualquier instante; o bien, si las variaciones en ellas son muy pequeñas con respecto a sus valores medios y estos no varían con el tiempo.

Con respecto al espacio, los fluidos se clasifican en uniformes, es uniforme si en un instante particular el vector velocidad es idéntico en cualquier punto del flujo, en otras palabras cuando las cantidades físicas permanecen constantes en el espacio. En caso contrario, el flujo es no uniforme y existen cambios.

Aunque un flujo sea permanente no significa necesariamente que éste sea uniforme, se pueden presentar las siguientes combinaciones:

- a) Flujo uniforme permanente: ninguna de las características del flujo (presión y velocidad) varían en el espacio o tiempo.
- b) Flujo uniforme no permanente: las características no varían con el espacio pero sí con el tiempo. Es difícil encontrar este tipo de flujo en la naturaleza, debido a que los cambios tendrían que ocurrir en forma simultánea a todo lo largo de la tubería.
- c) Flujo variado (no uniforme) permanente: las características del flujo varían con el espacio pero no con el tiempo. Existen dos subtipos de flujo:
 - 1) Gradualmente variado: los cambios en las características del flujo (presión y velocidad) son graduales a lo largo de la dirección principal de este. Las contracciones y expansiones suaves en tuberías, son ejemplos de este tipo de flujo.
 - 2) Rápidamente variado: los cambios en las características del flujo son abruptos a lo largo de la dirección principal de este. Por ejemplo, las contracciones abruptas en

tuberías y el flujo a través de válvulas. Generalmente este tipo de flujo va acompañado de gran turbulencia.

- d) Flujo variado no permanente: las características del flujo varían con el espacio y con el tiempo. Debido a que el flujo uniforme no permanente no existe, este tipo de flujo se conoce con el nombre de flujo no permanente. En el caso de tuberías, el flujo no permanente se denomina golpe de ariete, debido a que usualmente está acompañado por ruidos fuertes, además de cambios bruscos en presión y velocidad. [Saldarriaga, 2007].

El flujo puede clasificarse en tridimensional, bidimensional y unidimensional. Es tridimensional cuando sus características varían en el espacio; éste es el caso más general de flujo. Es bidimensional cuando sus características son idénticas sobre una familia de planos paralelos, no habiendo componentes en dirección perpendicular a dichos planos, solo actúa en dos direcciones únicamente. Es unidimensional cuando el vector de velocidad sólo depende de una variable espacial; es decir, se desprecian los cambios de velocidad transversales a la dirección principal del escurrimiento. Dichos flujos se dan en tuberías largas y rectas o entre placas paralelas.

Otra manera de analizar el comportamiento del flujo de los fluidos en los conductos cerrados se clasifica en laminar, de transición y turbulento con base en el número adimensional llamado Número de Reynolds, en honor a Osborne Reynold [1883], quien, con base en sus experimentos fue el primero que propuso el criterio para distinguir los tipos de flujo, estudió las condiciones en las que el flujo dentro de una tubería experimenta una transición de flujo laminar a flujo turbulento. Éste número permite destacar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia. [Sotelo, 1991].

El número de Reynolds está dado en el caso de un conducto cilíndrico a presión como:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

O bien

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.2)$$

Siendo

ρ es la densidad del fluido, $[Kg/m^3]$

V es la velocidad característica del fluido,

$[m/s]D$ es el diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido,
 $[m]$

μ es la viscosidad dinámica del fluido, $[Pa \cdot s]$

ν viscosidad cinemática del fluido, $[m^2/s]$

Para el caso del agua $\nu = 1.0 \times 10^{-6} m^2/s$ a una temperatura de $20^\circ C$.

Flujo laminar: En este tipo de flujo las partículas se mueven siguiendo trayectorias separadas de manera casi paralela. Esta limitado por un valor del número de Reynolds en un intervalo de 2000 a 2300. Tomando usualmente $Re_{crit} = 2000$. Ver figura 2.1.

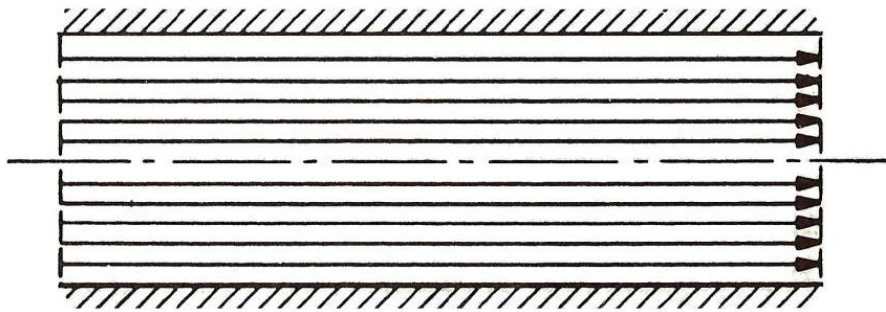


Figura 2.1. Esquema de flujo laminar [Sotelo, 1991].

Flujo turbulento: En este flujo las partículas tienden a un movimiento errático, se presenta movimiento en dirección transversal a la del flujo. Los valores del número de Reynolds en este tipo de flujo están en el intervalo $Re > 4000$.

Dentro del flujo turbulento hay tres divisiones, flujo turbulento hidráulicamente liso, otro de transición o intermedio y el tercero, rugoso. Estas están relacionadas con el comportamiento de la tubería de acuerdo a la rugosidad relativa de la misma. Ver figura 2.2.

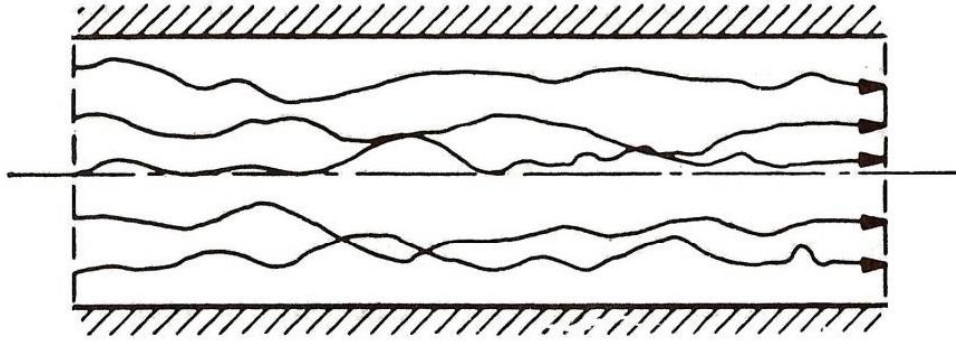


Figura 2.2 Esquema de flujo turbulento. [Sotelo, 1991].

Flujo de transición: Este tipo de flujo está comprendido en un intervalo del número de Reynolds entre $2000 < Re < 4000$. Es decir este régimen, está limitado por los regímenes laminar y turbulento. [Patiño, 2011].

En los siguientes subtemas se muestran las ecuaciones más conocidas para el cálculo de pérdidas por fricción.

2.2 Ecuación de Darcy-Weisbach.

Para un flujo permanente, en un tubo de diámetro constante, la línea de cargas piezométricas es paralela a la línea de energía e inclinada en la dirección del movimiento. En 1850, Darcy, Weisbach y otros, dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo la pérdida por fricción.

Es una de las expresiones más recomendadas, ya que tiene homogeneidad dimensional y bases teóricas, además de que considera bajo qué régimen de flujo se desarrolla: laminar, de transición o turbulento. La ecuación general es la que se muestra a continuación:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Dónde:

f es el factor de fricción de Darcy, [adimensional]

L es la longitud del tramo que se está analizando, [m]

D es el diámetro interior de la tubería, [m]

V es la velocidad media con la que circula el líquido, [m/s]

g es la aceleración de la gravedad, [m/s²]

Otra manera en que puede expresarse, en términos del gasto Q (siendo $Q = VA$)

$$h_f = \left(\frac{8fL}{\pi^2 g D^5} \right) Q^2 \quad (2.4)$$

El factor de fricción f depende básicamente del tipo de flujo que se desarrolla dentro de la tubería, representado por el número adimensional de Reynolds (Re) y de la relación entre el diámetro interior y la rugosidad de la misma.

A continuación se muestran algunas fórmulas para obtener el coeficiente de Darcy dependiendo del tipo de flujo que se trate. Es importante mencionar que estas requieren resolverse mediante algún método iterativo.

En el tipo de flujo laminar aplica la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$h_f = \frac{128 \nu L Q}{\pi D^4 g} \quad (2.5)$$

Al compararla con la ecuación de Darcy-Weisbach se dedujo lo siguiente:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.6)$$

Para el flujo turbulento hidráulicamente liso, el valor del factor de fricción no se ve afectado por la rugosidad de la tubería, varía únicamente con el número de Reynolds. Blasius sugirió la siguiente expresión:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (2.7)$$

Es válida la expresión para un intervalo de $4000 \leq Re \leq 100000$.

Mientras que Prandtl, sugirió la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \operatorname{Log} (Re \sqrt{f}) - 0.8 \quad (2.8)$$

Que se puede escribir también de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \operatorname{Log} \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.9)$$

Para el tipo de flujo turbulento hidráulicamente rugoso, Prandtl propuso la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \operatorname{Log} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (2.10)$$

Se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \operatorname{Log} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} \right) \quad (2.11)$$

Dónde:

ε representa la rugosidad absoluta de la tubería, (mm).

Esta varía de acuerdo con el material con que esté fabricada la tubería y con el nivel de su acabado interior.

Algunos valores de la rugosidad absoluta para diferentes tipos de tuberías se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Valores para la rugosidad absoluta “ε”. [Sotelo, 1991]

Material	ε (mm)
Vidrio, latón, plástico, hule, madera bien cepillada	0.0015
Hierro fundido (nuevo)	0.25
Hierro fundido (oxidado)	1.00-1.50
Hierro fundido (con incrustaciones)	1.50-3.00
Hierro fundido con bridas o juntas macho y campana (nuevo)	0.15-0.30
Hierro fundido con bridas o juntas macho y campana (usado)	2.00-3.50
Hierro galvanizado	0.15
Acero soldado con una mano interior de pintura (nuevo)	0.0015
Acero soldado (nuevo)	0.05-0.10
Acero soldado (limpiado después de mucho uso)	0.15-0.20
Acero soldado (moderadamente oxidado, pocas incrustaciones)	0.40
Acero soldado (moderadamente oxidado, muchas incrustaciones)	3.00
Asbesto-cemento (nuevo)	0.025
Asbesto-cemento (con protección interior de asfalto)	0.0015
Concreto con acabado liso	0.025
Concreto con acabado normal	1.00-3.00
Concreto con acabado rugoso	10.00
Cemento liso	0.30-0.08
Cemento no pulido	1.00-2.00

Para el caso del flujo turbulento de transición o intermedio, se utiliza la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \operatorname{Log} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.12)$$

Esta fórmula es aplicable a tubos lisos, semirugosos y rugosos, es decir se trata de una fórmula universal. La única excepción corresponde a la circulación laminar ($Re < 2000$) en la que debe de usarse la ecuación 2.5.

Para el caso de flujo de transición suele utilizarse la ecuación 2.12.

Cabe mencionar que aparte de las ecuaciones mostradas anteriormente existen también diagramas y ábacos, en los cuales se puede determinar el valor de f . En 1944, L.F. Moody tras ensayar con nuevos materiales publico sus resultados, esta vez en forma grafica, en un abaco que se conoce como el “**Diagrama de Moody**” el cual se muestra en la figura 2.3.

El diagrama de Moody es una grafica log-log del factor de fricción f frente al número de Reynolds Re , actuando la rugosidad relativa ε_r como parametro de las diversas curvas. Posee la virtud de que permite determinar el valor del factor de fricción a partir de los parametros adimensionales Re y ε_r , sin necesidad de recurrir a procedimientos iterativos. [Basurto, 2014].

Existen múltiples aproximaciones a la ecuación de Colebrook-White, una de las más usadas es la de Swamee y Jain (1976) encontraron lo siguiente:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.75}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (2.18)$$

Válida para $5000 < Re < 10^8$ y $10^{-6} < (\varepsilon/D) < 10^{-2}$

Una opción que evita cualquier proceso de prueba y error se hace posible mediante fórmulas empíricamente derivadas, como las que fueron presentadas por Swamme y Jain (1976) para flujo desarrollado en un tubo:

$$h_L = 1.07 \frac{Q^2 L}{g D^5} \left\{ \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + 4.62 \left(\frac{vD}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad (2.23)$$

$$10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$$

$$3000 < Re < 3 \times 10^8$$

$$Q = -0.965 \left(\frac{g D^5 h_L}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{3.17 v^2 L}{g D^3 h_L} \right)^{0.5} \right] \quad (2.24)$$

$$Re > 2000$$

$$D = 0.66 \left[e^{1.25 \left(\frac{L Q^2}{g h_L} \right)^{4.75}} + v Q^{9.4} \left(\frac{L}{g h_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad (2.25)$$

$$10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$$

$$5000 < Re < 3 \times 10^8$$

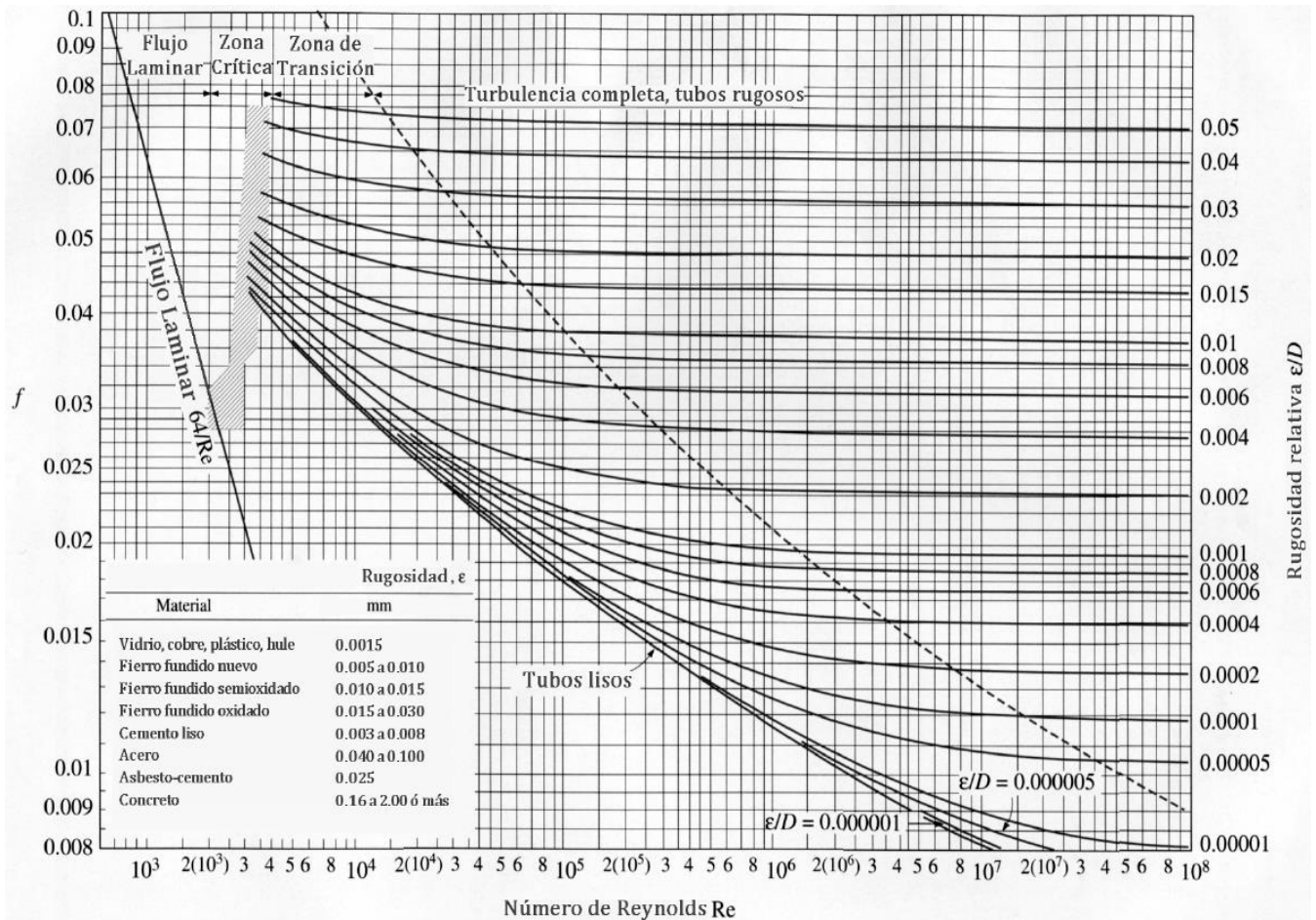


Figura 2.3 Diagrama universal de Moody, [Sotelo, 1999].

2.3 Ecuación de Manning.

La fórmula de Manning (Chie, 1992) es sin duda la más popular aplicada en el diseño hidráulico del flujo en canales, sin embargo, se puede usar también para el cálculo de pérdidas por fricción en conductos cerrados. Originalmente fue derivada de manera empírica. Rouse (1938) y Keulegan (1938), están entre los primeros que intentaron justificar la fórmula de Manning bajo las bases de la mecánica de fluidos al relacionar su coeficiente con la f de Darcy-Weisbach.

Esta ecuación es más usada en flujo a superficie libre, aunque también se puede usar en flujo a presión. Se utiliza un factor de rugosidad n , se denomina usualmente coeficiente

de rugosidad de Manning, los valores de este coeficiente se encuentran en diversas tablas. La ecuación es la siguiente:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2} \quad (2.29)$$

Si se despeja hf de la ecuación anterior para poder estimar las pérdidas por fricción se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R h^{2/3} \left(\frac{hf}{L}\right)^{1/2}$$

Como:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} ; Rh = \frac{D}{4}$$

$$\frac{LQn}{\frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3}} = hf$$

$$hf = \frac{10.2936 n^2 L}{D^{16/3}} Q^2 \quad (2.30)$$

Dónde:

n es el coeficiente de rugosidad de Manning, (adimensional).

Q es el gasto que fluye a través de la tubería, (m^3/s).

S es la pendiente o pérdida unitaria de carga $S = \frac{hf}{L}$, (m,m). En la siguiente tabla se enlistan algunos valores de este coeficiente:

Tabla 2.2 Valores para el coeficiente de rugosidad "n" [Sotelo, 1991].

Material	N
Acero galvanizado (nuevo y usado)	0.014
Acero remachado (nuevo)	0.015-0.016
Acero soldado con remache avellanado (nuevo)	0.012-0.013
Hierro fundido limpio (nuevo)	0.013
Concreto monolítico cimbrado deslizante ($D < 1.25 m$)	0.010-0.011
Concreto monolítico cimbrado deslizante y pulido ($D < 1.25 m$)	0.011-0.0123
Concreto monolítico cimbrado deslizante y sin pulir ($D < 1.25 m$)	0.014-0.015
Concreto con acabado tosco ($D < 1.25 m$)	0.015-0.017
Concreto con juntas macho y campana ($D < 0.80 m$)	0.0105-0.012

Concreto con juntas toscas ($D > 0.50\text{ m}$)	0.0125-0.014
Concreto con juntas toscas ($D < 0.50\text{ m}$)	0.014-0.017
Tubos de barro vitrificado	0.011
Túneles perforados en roca sin revestimiento	0.025-0.040
Madera cepillada	0.0105-0.012

2.4 Ecuación de Hazen-Williams.

En 1906 G. S. Williams y A.H. Hazen, desarrollaron una ecuación, dicha ecuación tiene una gran aceptación en el campo de la hidráulica debido a que es sencilla y fácil de aplicar, cabe mencionar que es de naturaleza semiempírica [Saldarriaga, 2007].

$$V = 0.355 C_{HW} D^{0.63} S_f^{0.54} \quad (2.31)$$

Si se despeja hf de la ecuación anterior para poder estimar las pérdidas por fricción se obtiene la siguiente expresión:

$$h_f = \frac{10.6470 L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.871}} Q^{1.852} \quad (2.32)$$

Dónde:

C_{HW} es el coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams, (adimensional).

En la siguiente tabla se enlistan algunos valores de este coeficiente:

Tabla 2.3 Valores para el coeficiente de rugosidad " C_{HW} " [Sotelo, 1991].

Material	C_{HW}
Acero corrugado	60
Acero galvanizado (nuevo y usado)	125
Acero remachado (nuevo)	110
Acero remachado (usado)	85
Acero soldado o con remache avellanado (nuevo)	120
Acero soldado o con remache avellanado (usado)	90
Hierro fundido limpio (nuevo)	130
Hierro fundido sin incrustaciones (usado)	110
Hierro fundido con incrustaciones (viejo)	90
Plástico	150

Asbesto-cemento (nuevo)	135
Cobre o latón	130
Acabado interior en cemento pulido	100
Concreto, acabado liso	130
Concreto, acabado común	120
Tubos de barro vitrificado	110
Madera cepillada	120

Cabe mencionar que el coeficiente C_{HW} no solo depende de la rugosidad de la tubería, sino también del radio hidráulico y de la pendiente, por lo que carece de homogeneidad dimensional. Debe ser empleada con cuidado, sobre todo en el caso de tuberías de diámetros grandes. Como es una medida de la rugosidad relativa el coeficiente de Hazen-Williams, por lo tanto no es una característica física del tubo, por esta razón, el uso de la ecuación de Hazen-Williams debe estar limitado a ciertas características del fluido y del flujo. Los límites, establecidos claramente por los investigadores y sus pruebas experimentales, son los siguientes:

- 1) El fluido debe ser agua a temperaturas normales.
- 2) El diámetro debe ser superior o igual a 75 mm (3 pulg).
- 3) La velocidad en las tuberías debe ser inferior a 3 m/s (10 pies/seg).

Se deben de tomar en cuenta los límites establecidos para la utilización de la ecuación de Hazen-Williams, de lo contrario es posible que se realicen diseños ineficientes pues si no se encuentran en el rango de validez la ecuación tiende a sobreestimar los diámetros requeridos.

3. Las pérdidas locales en conductos a presión.

Las tuberías que se utilizan para la conducción de agua están compuestas generalmente por tramos rectos y curvos, esto debido a que se busca adaptarse en la medida posible a la topografía del terreno, aunado a que muchas veces, es necesario que las tuberías tengan cambios de sección debido a la demanda que se desee satisfacer. Además, se requiere de dispositivos para el control de la carga como lo son, válvulas, cruces, codos, rejillas, compuertas y entre otros. Naturalmente estos cambios originan pérdidas de energía que ocurren en los puntos específicos donde están ubicados tales elementos, distintas a las pérdidas que son originadas por la fricción.

En este capítulo se hace una explicación general de lo que son las pérdidas locales, así como de los factores que las originan (piezas especiales o accesorios), describiendo con detenimiento las pérdidas locales de energía en uniones tipo "T" y en las uniones tipo cruz. Se presentan algunas ecuaciones propuestas por diferentes autores para el cálculo de pérdidas locales en los dos tipos de uniones mencionados.

Se incluye un apéndice al final del capítulo, en donde se muestran tablas, figuras y gráficas con diferentes valores para el coeficiente de pérdida local (K) dependiendo del accesorio en estudio.

3.1 Descripción general de lo que son las pérdidas locales.

La energía contenida en un conducto a presión donde el agua fluye a lo largo de éste, usualmente se ve alterada por una variedad de factores, un factor de importancia es el que se origina por la fricción que se da entre el contacto del agua y del material del que este hecho la tubería, en el capítulo 2 se habló acerca de este tema. Sin embargo existen otro tipo de pérdidas de energía en puntos específicos de una red, como cuando se da un cambio de dirección, una unión de tuberías tipo "T" y cruz, ampliación, reducción, curvaturas y por accesorios tales como válvulas. Estas pérdidas llamadas pérdidas locales, menores, secundarias, localizadas, singulares o por accesorios se originan, generalmente, por las perturbaciones que los elementos mencionados inducen en el flujo del conducto a presión, [Patiño, 2011].

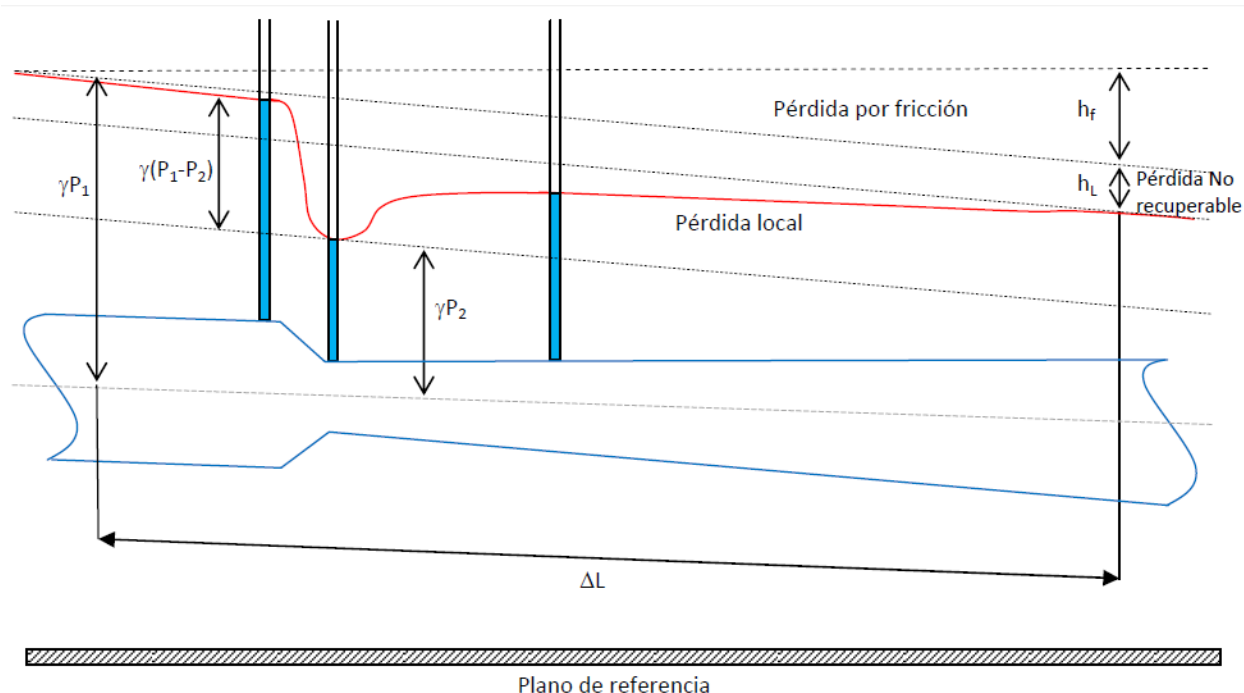


Figura 3.1 Pérdida de energía, [Hurtado, 2013].

Usualmente estas perturbaciones son turbulencias, torbellinos y vórtices, con ello parte de la energía del fluido se disipa en forma de calor. Un ejemplo claro se puede observar en la figura 3.2, el flujo que circula dentro de la tubería al encontrarse con un medidor (de caudal) de orificio circular comienza a experimentar turbulencias antes y después de este dispositivo, acompañado de una disminución de la carga estática y con ello un aumento de la carga de velocidad debido a que el flujo se va comprimiendo debido a la obstrucción (reducción) originada por el medidor. Después de donde está localizado el medidor de orificio circular, la vena contracta se mantiene hasta una cierta longitud de la tubería, acompañada de turbulencias, como ya se había mencionado anteriormente, hasta que llega un punto en el cual esta vena comienza a expandirse gradualmente, sin embargo es importante señalar que sigue existiendo turbulencia. La carga estática vuelve a incrementarse, pero no alcanza el mismo nivel con el que entró al accesorio, justo esta diferencia de cargas corresponde a la pérdida localizada h_L . En la imagen se pueden apreciar también otra clase de dispositivos los cuales son tubos Venturi, estos miden el caudal a partir de una diferencia de presión existente en el lugar donde entra la corriente y el punto donde está localizado.

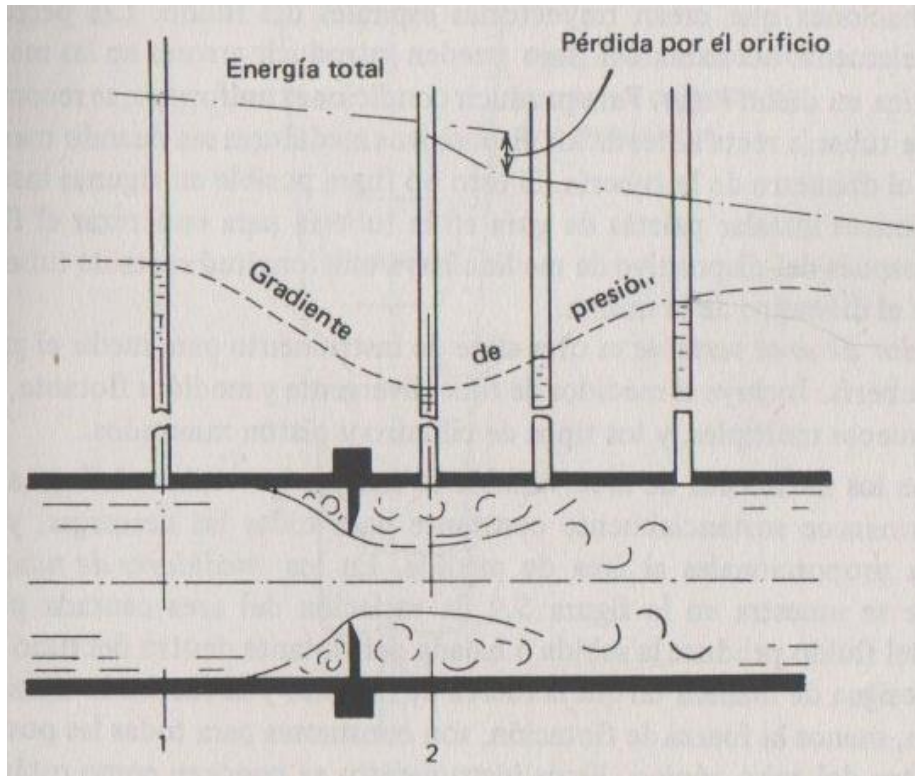


Figura 3.2 Flujo a través de un medidor de orificio circular, [Simon, 1983].

Actualmente existen varios métodos que permiten considerar las pérdidas locales, la más común de ellas es plantear su magnitud en términos de una constante de proporcionalidad K de la carga de velocidad de la sección inmediatamente aguas abajo de donde se encuentre el accesorio estudiado, como se muestra a continuación:

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.1)$$

Donde:

h_L es la pérdida local de energía, [m]

K es el coeficiente de proporcionalidad, también llamado coeficiente de pérdida local o simplemente coeficiente K del accesorio. Depende del tipo de pérdida que se trate, del número de Reynolds y de la rugosidad del tubo, [adimensional]

$\frac{V^2}{2g}$ es la carga de velocidad aguas abajo de la zona de alteación del flujo, siendo V la velocidad media, [m/s]

El valor del coeficiente de pérdida local K es variable, como ya se había mencionado, depende de que pieza especial se esté estudiando, existe diversa bibliografía en donde se pueden encontrar valores de dicho coeficiente para accesorios específicos.

Para la mayoría de los accesorios se ha notado una variación del coeficiente de pérdida local K cuando el número de Reynolds (Re) varía, sin embargo permanece constante para valores del número de Reynolds superiores a 50,000. Es decir se puede tomar el valor de K como constante en los casos en donde el flujo sea régimen turbulento.

Otro método utilizado frecuentemente es el de la longitud equivalente L_e , el cual consiste en agregar al modelo longitudes ficticias de tubería en los tramos donde se ubican los accesorios, de tal forma que se produzcan las mismas pérdidas de energía que las que ocasionaría cada uno de los accesorios ubicados en ella.

Para finalizar el hecho de que se denominen pérdidas menores no significa que carezcan de importancia, aunque frecuentemente son despreciadas en los cálculos hidráulicos de un proyecto, existen condiciones en la cuales las pérdidas menores o locales son de gran importancia, por ejemplo cuando se trata de redes que cuentan con longitudes cortas, cambios de alineamiento y una vasta cantidad de accesorios. En una toma domiciliaria, se ha reportado por algunos autores pérdidas menores de 2 a 5 veces la magnitud de las pérdidas por fricción, para diámetros entre 13 mm y 19mm, y gastos que oscilan de 0.20 l/s y 0.40 l/s. A comparación de las pérdidas por fricción, donde existen numerosas expresiones para su obtención, de origen teórico o empírico, en el caso de las pérdidas locales son pocas las expresiones que tiene fundamentación puramente teórica, por lo que se encuentra variedad de resultados experimentales reportados por diferentes investigadores y compañías proveedoras o fabricantes de los accesorios. Sin embargo, en muchas ocasiones, puede llegar a encontrarse resultados muy diferentes para accesorios similares, por lo que es conveniente tener cuidado a la hora de elegir un valor de K para su utilización.

3.2 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “T” y cruz.

En las últimas décadas se ha tomado especial interés en un tipo de accesorios o piezas especiales, su característica primordial es que en estos elementos convergen o divergen dos o más flujos. Ejemplos de este grupo de accesorios son las uniones tipo “T” y los cruces. Los estudios se han enfocado más al primero, también conocido como bifurcaciones, ya que dividen el flujo principal en dos flujos secundarios. En cuanto a los cruces, el caso más conocido es la trifurcación, es decir un flujo principal que se divide en tres flujos más pequeños.

Todos estos elementos mencionados están teniendo una gran importancia en el medio constructivo sobre todo en redes pequeñas, donde la influencia que tienen sobre la energía puede llegar a ser importantes.

3.2.1 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “T”.

Como se había mencionado anteriormente las uniones tipo “T” también son conocidas como bifurcaciones.

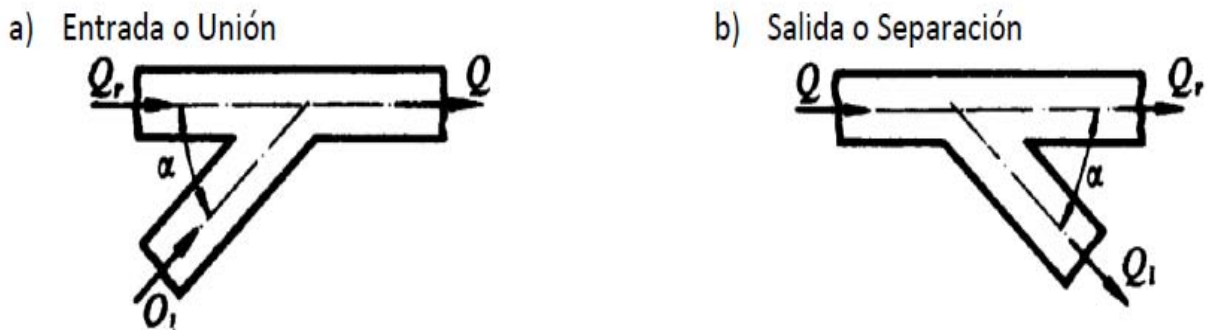


Figura 3.27 Esquema de entrada y salida de tes en redes, [Mataix, 1982].

La pérdida de energía en una bifurcación en un conducto a presión depende del ángulo que forma la tubería secundaria de la principal, de la relación entre el diámetro de cada una de las tuberías y de la dirección de la corriente como se muestra en la figura 3.2. La pérdida es mayor en la unión que en la misma bifurcación.

Hay una variedad de materiales con los que están hechas las uniones tipo "T", como el cobre (figura 3.28), de PVC (figura 3.29) y entre otros. Incluso de distintos ángulos de inclinación como de 90° (figura 3.28 y 3.29), 60° y 45° (figura 3.30).



Figura 3.28 "T" de cobre



Figura 3.29 "T" de PVC



Figura 3.30 "T" de PVC (45°)

Existen diversos autores que han hecho aportaciones en este tema, como Vogel, Petermann y Kinne, quienes obtuvieron coeficientes de pérdidas K en bifurcaciones en tuberías con cantos redondeados (Tabla 3.13) y agudos (Tabla 3.14).

Mientras que por otro lado, Pürschel (1966) propone valores de K para cuando el gasto es divergente en bifurcaciones a 45° (Tabla 3.15) y 90° (Tabla 3.16). Es importante tomar en cuenta que los coeficientes K negativos significan ganancia de energía, ya que en algunas tablas aparecen valores negativos.

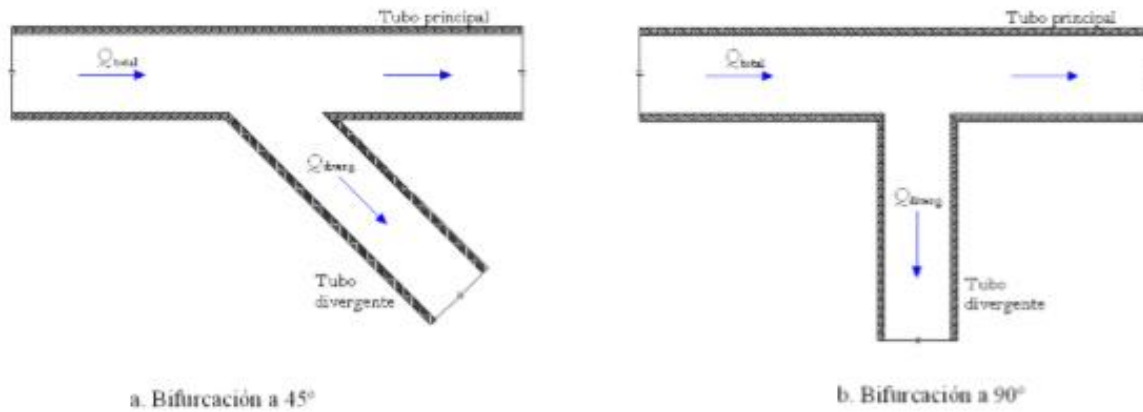


Figura 3.31 Esquema de bifurcaciones, [Patiño, 2011].

Para diámetros de 13, 19 y 25 mm, Fuentes y Rosales (2004) estimaron los valores de los coeficientes de pérdidas locales K , en bifurcaciones a 90° (tes) en tubería de cobre (figura 3.26).

Existe una propuesta de ecuaciones para encontrar el valor del coeficiente K para las uniones tipo “T” citadas por la M. en I. Arabeli Hurtado Rodríguez, nombrada “Algunos aspectos sobre la importancia de considerar las pérdidas locales en el cálculo de redes de agua potable” (México, Junio 2013) en dicho documento se obtuvieron, a partir de los valores propuestos por diversos autores para las diferentes combinaciones en cuanto a su funcionamiento de dichos elementos, formulas genéricas que dependían únicamente de la relación entre los gastos Q de entrada y salida que circulaban a través de las piezas, bajo la suposición de que las tres conexiones son de diámetro igual. A continuación las ecuaciones propuestas en dicho documento.

Considerando cada uno de los casos, se obtuvieron las siguientes fórmulas:

Donde:

K es el coeficiente de pérdida local.

Q_1 es el gasto que sale o entra a la tubería secundaria.

Q_r es el gasto de la tubería principal.

Q es el gasto total, la suma de Q_r y Q_1 , de la tubería que se unió o se separó.

a) Entrada o Unión.

Tabla 3.17 Fórmulas para coeficientes “K” par entradas tes.

Ángulo	Dirección	Fórmula
90°	$Q_r - Q$	$k = -0.795 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 1.204 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.083$
	$Q_l - Q$	$k = -1.6775 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 3.6678 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) - 0.9591$
60°	$Q_r - Q$	$k = -1.497 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 1.1292 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.1393$
	$Q_l - Q$	$k = -1.6413 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 3.1151 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) - 0.8277$
45°	$Q_r - Q$	$k = -1.4566 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 0.8608 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.0639$
	$Q_l - Q$	$k = -1.7334 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 2.9575 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) - 0.8888$

b) Salida o Separación

Tabla 3.18 Fórmulas para coeficientes “K” par entradas tes.

Ángulo	Dirección	Fórmula
90°	$Q - Q_r$	$k = 0.685 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 0.3282 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.0142$
	$Q - Q_l$	$k = 0.9739 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 0.6966 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 1.0205$
60°	$Q - Q_r$	$k = 0.658 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 0.3033 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.0142$
	$Q - Q_l$	$k = 1.1383 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 1.4599 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 1.0782$
45°	$Q - Q_r$	$k = 0.6653 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 0.3161 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.015$
	$Q - Q_l$	$k = 1.2321 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 - 1.7547 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.9723$

3.2.2 Pérdidas locales en uniones de tuberías tipo “cruz”.

Como ya se había descrito anteriormente, existen numerosos valores del coeficiente K para accesorios de uso común en tuberías, sin embargo hay poca información sobre las pérdidas de energía que se producen en un cruce de tuberías. Esto se debe en parte a la poca difusión que estos accesorios tenían en el pasado, incluso existía poca oferta en el mercado de estos elementos.

Conforme ha transcurrido el tiempo, los “cruces” han tomado importancia debido a su frecuente utilización, ejemplos de ello son, en una red de distribución de agua a presión, siendo la más habitual una red contra incendio, sistemas de riego, sistema de abastecimiento de agua potable, una red de gas domiciliario, entre otros.

Actualmente podemos encontrar “cruces” de tuberías en diversos materiales, como en PVC (figura 3.32), cobre (figura 3.33), hierro galvanizado, acero carbón (figura 3.34), polietileno de alta densidad (figura 3.35) y etc. Y también en diversos diámetros, de varias pulgadas o inferiores a 1 pulgada.



Figura 3.32 Cruce de PVC



Figura 3.33 Cruce de cobre



Figura 3.34 Cruce de acero carbón



Figura 3.35 Cruce de polietileno de alta densidad

En todo cruce de tuberías se dan cuatro casos de flujo posibles, el primer caso se da cuando el flujo llega por una de las cuatro tuberías (tramos) y sale por las tres que restan, usualmente este caso es llamado trifurcación, flujo dividido o con alimentación simple. (Figura 3.36).

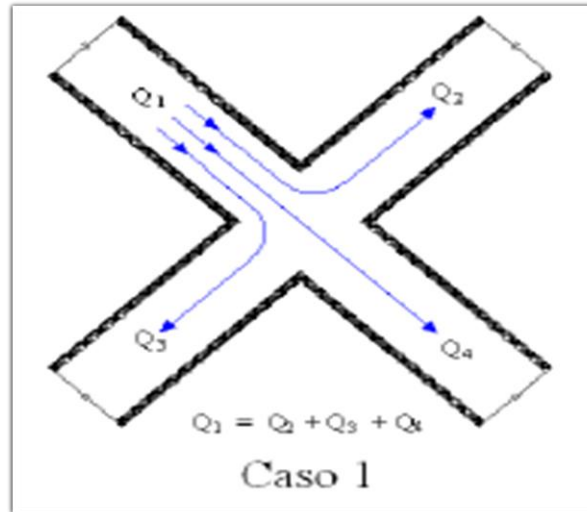


Figura 3.36 Flujo dividido, [Patiño, 2011].

El segundo caso es aquel donde el flujo llega por dos tramos y sale por los dos restantes, en este los dos tramos de llegada son adyacentes. Usualmente es llamado flujo perpendicular o con alimentación doble. (Figura 3.37).

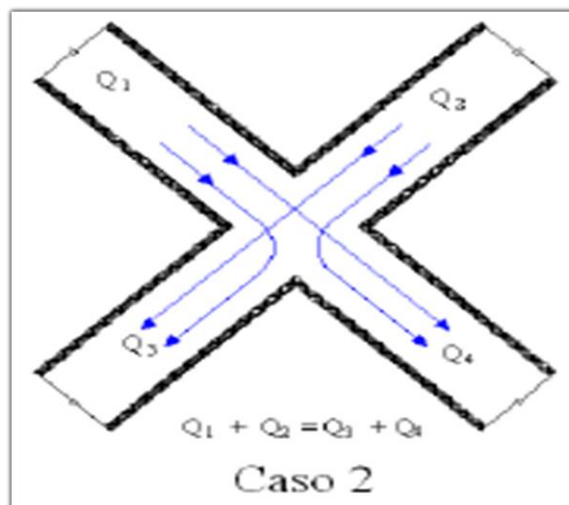


Figura 3.37 Flujo perpendicular, [Patiño, 2011].

Mientras que en el tercer caso, y al igual que en el segundo caso, el flujo entra por dos tramos y sale por los otros dos, sin embargo, los tramos de llegada son opuestos entre sí. Llamado flujo encontrado. (Figura 3.38).

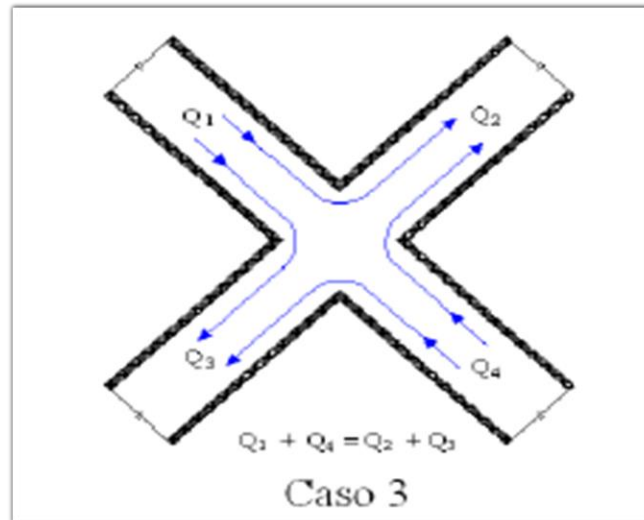


Figura 3.38 Flujo encontrado, [Patiño, 2011].

Por último, en el tercer caso el flujo entra por tres tuberías y sale por la tubería restante. Llamado flujo combinado. (Figura 3.39).

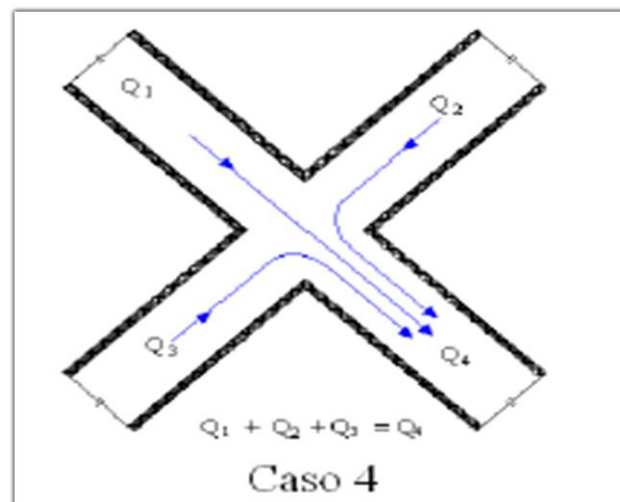


Figura 3.39 Flujo combinado [Patiño, 2011].

En la tesis nombrada "Pérdidas menores de energía en redes de tubería de agua potable" del M. I. Jaime Andrés Patiño Márquez (México Junio 2011) investigo los flujos combinado y dividido en cruces de tuberías de PVC de distintos diámetros de 13, 19, 25,

32 y 38mm. Como resultado, el autor obtuvo una serie de gráficas (basándose en el número de Reynolds tanto de entrada como de salida) de las que se pudieron deducirse ecuaciones de mejor ajuste para obtener los coeficientes K , dichas ecuaciones están contenidas en este mismo documento. Sin embargo, cabe resaltar, que estas ecuaciones son para el primer y segundo caso (flujo dividido y flujo perpendicular).

La nomenclatura de los tramos de los cruces usada por el M.I. Patiño es la siguiente:

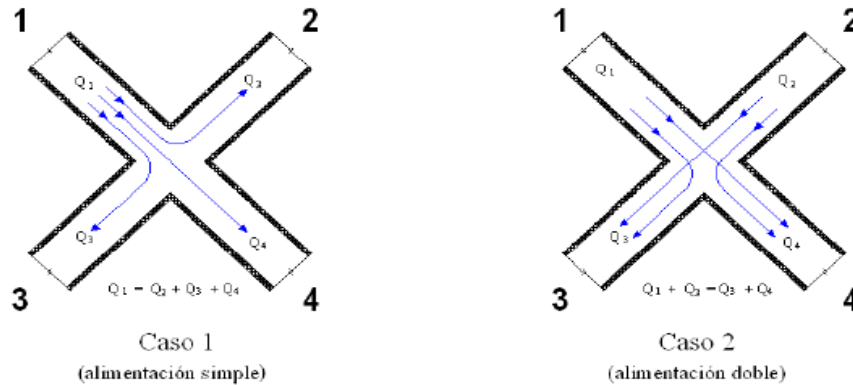


Figura 3.40 Nomenclatura asumida para los tramos en cruces de tuberías, [Patiño, 2011].

A continuación se presentan tablas que contienen las ecuaciones de mejor ajuste para el caso 1 (alimentación simple):

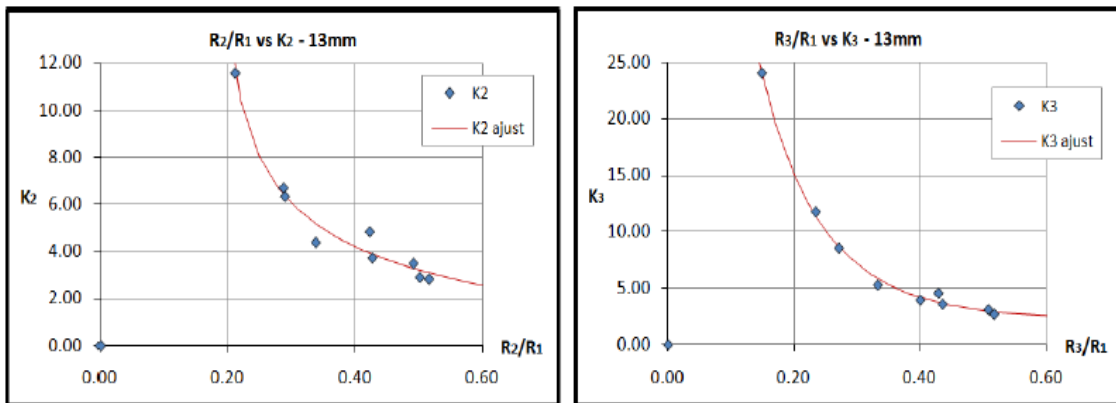


Figura 3.41 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 y de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruce de 13mm (Trifurcación), [Patiño, 2011].

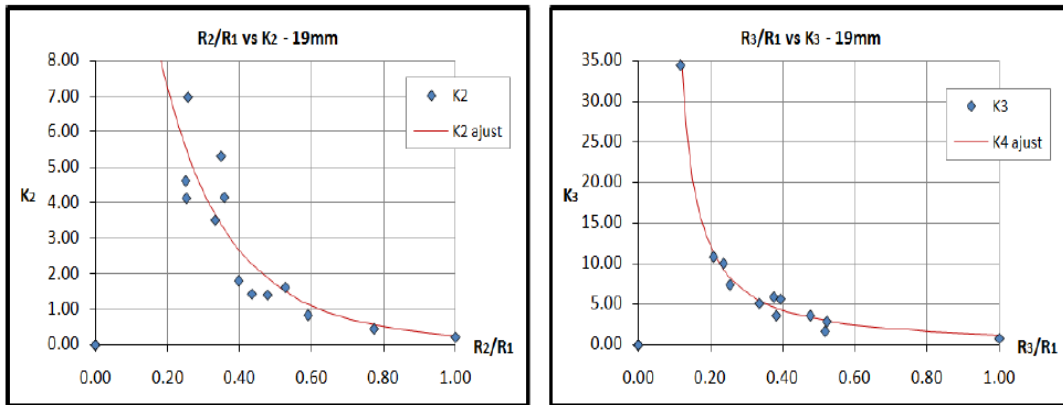


Figura 3.42 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 y de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruce de 19mm (Trifurcación), [Patiño, 2011].

Tabla 3.19 Ecuaciones de ajuste para los coeficientes de pérdidas K_2 y K_3 para cruces de 13 y 19mm (Trifurcaciones), [Patiño, 2011].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R^2
13 mm	K_2	$K_{2 \text{ ajust}} = \frac{1.48}{\left(\frac{Re_2}{Re_1} - 0.15\right)^{0.75}}$	0.97
13 mm	K_3	$K_{3 \text{ ajust}} = \frac{5.56}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.71\right)^{9.11}} + 2.07$	0.99
19 mm	K_2	$K_{2 \text{ ajust}} = \frac{89.24}{\left(\frac{Re_2}{Re_1} + 1.20\right)^{7.49}}$	0.78
19 mm	K_3	$K_{3 \text{ ajust}} = \frac{1.16}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} - 0.06\right)^{1.20}}$	0.99

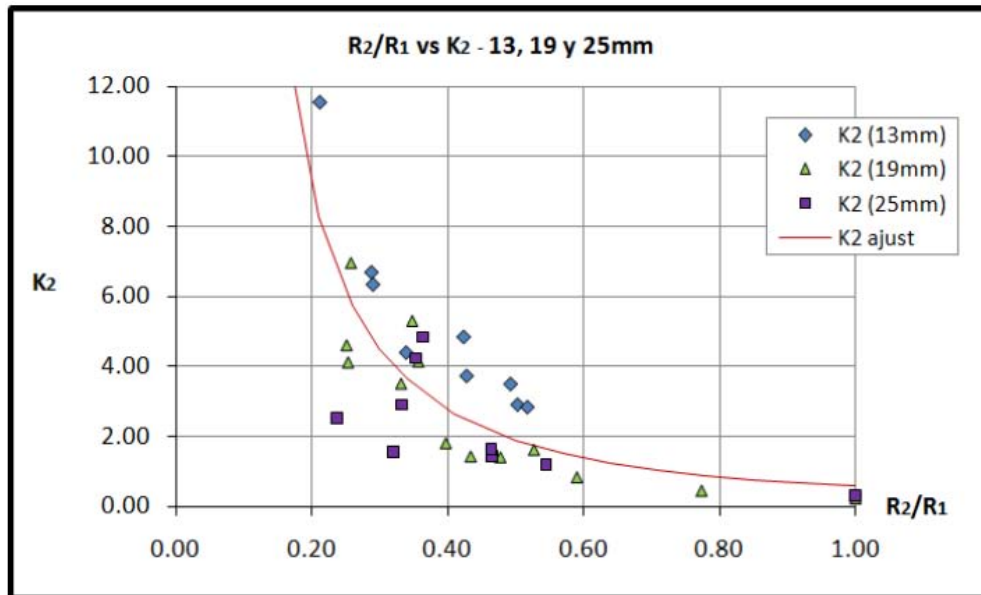


Figura 3.43 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 para cruces de 13, 19 y 25mm. (Trifurcación), [Patiño2011].

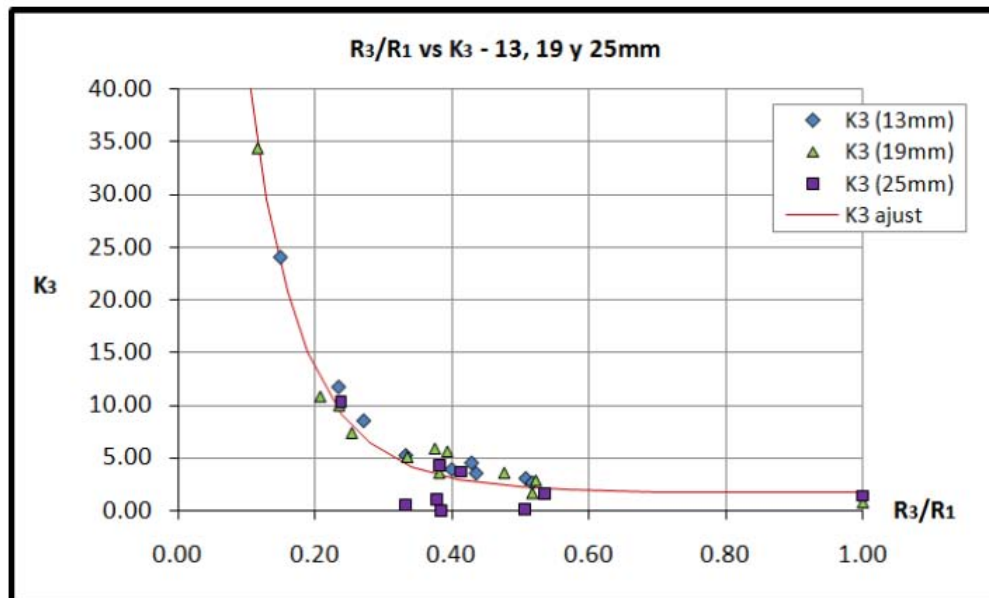


Figura 3.44 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruces de 13, 19 y 25mm. (Trifurcación), [Patiño, 2011].

Tabla 3.20 Ecuaciones de ajuste para K2 y K3 unificados para cruces de 13, 19 y 25mm (Trifurcaciones), [Patiño, 2011].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R ²
13, 19 y 25mm	K ₂	$K_{2\text{ ajust}} = \frac{0.58}{\left(\frac{Re_2}{Re_1}\right)^{1.71}}$	0.59
13, 19 y 25mm	K ₃	$K_{3\text{ ajust}} = \frac{10.21}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.79\right)^{11.61}} + 1.68$	0.94

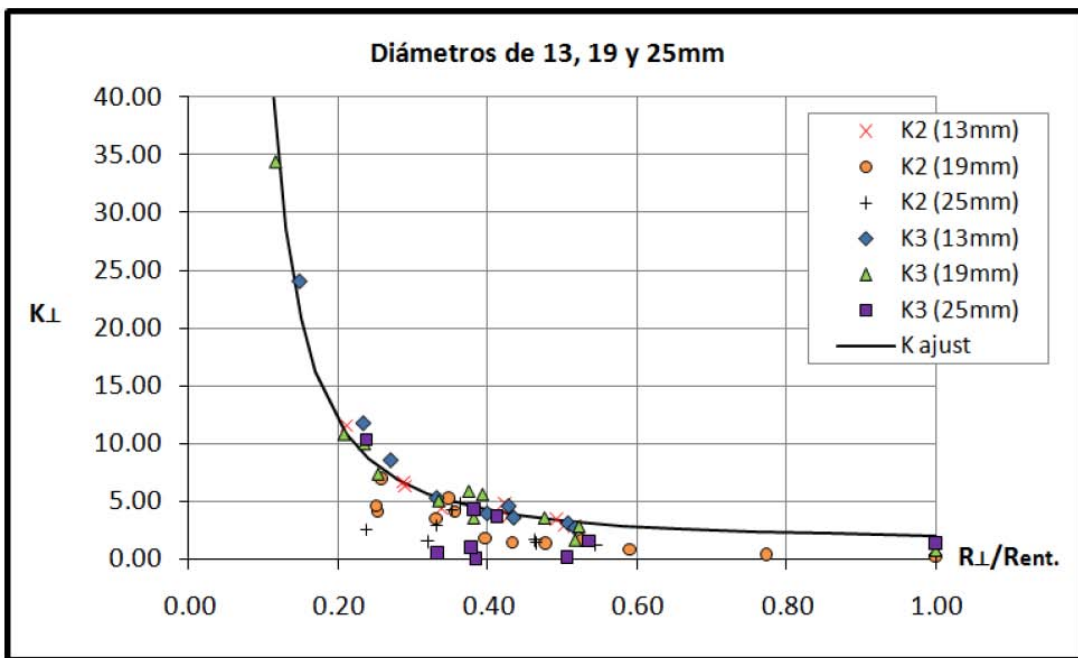


Figura 3.45 Gráficas de K3 Y K4 unificadas para cruces de 13, 19 y 25mm, (Trifurcación), [Patiño, 2011].

Tabla 3.21 Ecuaciones de ajuste para K_{\perp} para cruces de 13, 19 y 25mm (Trifurcaciones), [Patiño, 2011].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R^2
13, 19 y 25mm	$K_{\perp ajust}$	$K_{\perp ajust} = \frac{0.54}{\left(\frac{Re_{\perp}}{Re_{ent.}} - 0.04\right)^{1.59}} + 1.44$	0.88

En las siguientes tablas se presentan las ecuaciones de mejor ajuste para el caso 2 (alimentación doble):

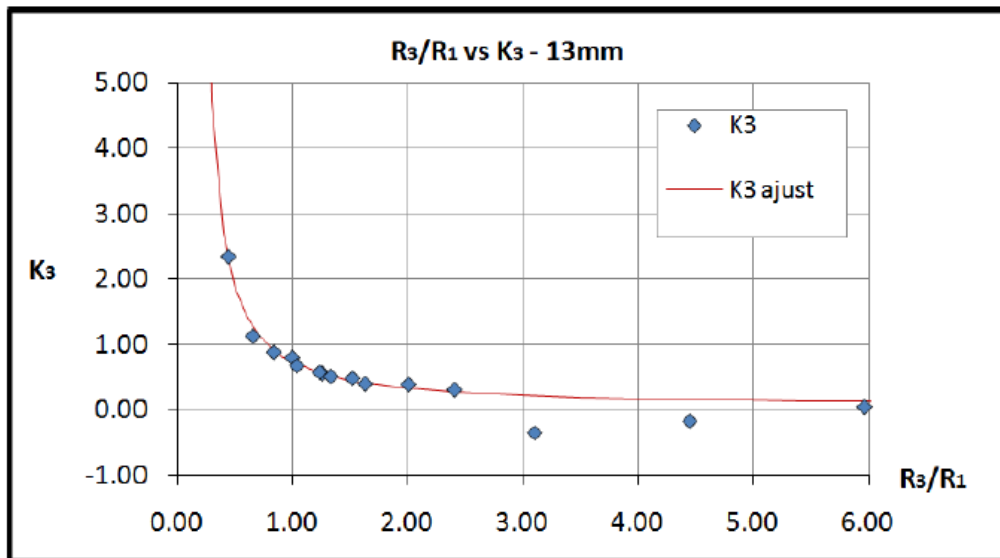


Figura 3.46 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruce de 13mm, [Patiño, 2011].

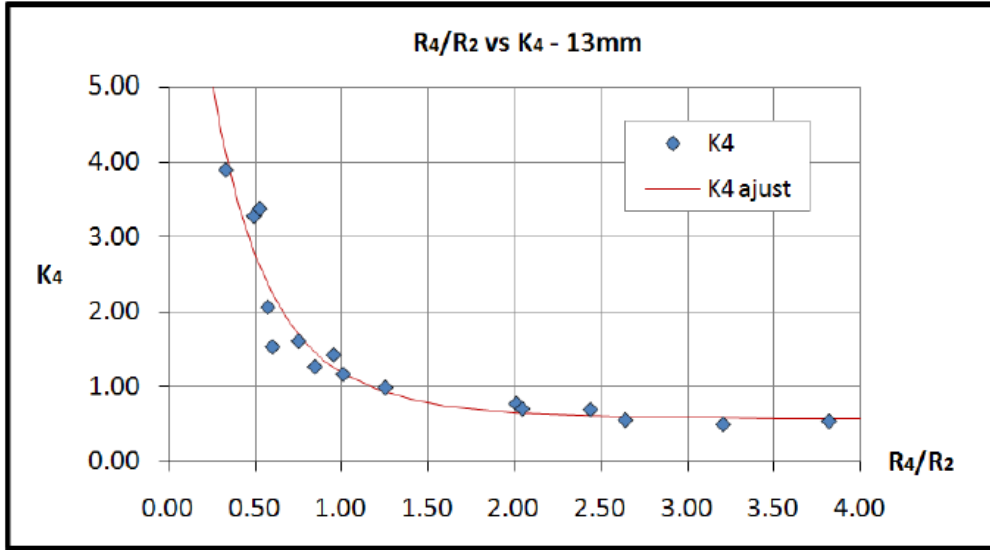


Figura 3.47 Gráficas de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruce de 13mm, [Patiño, 2011].

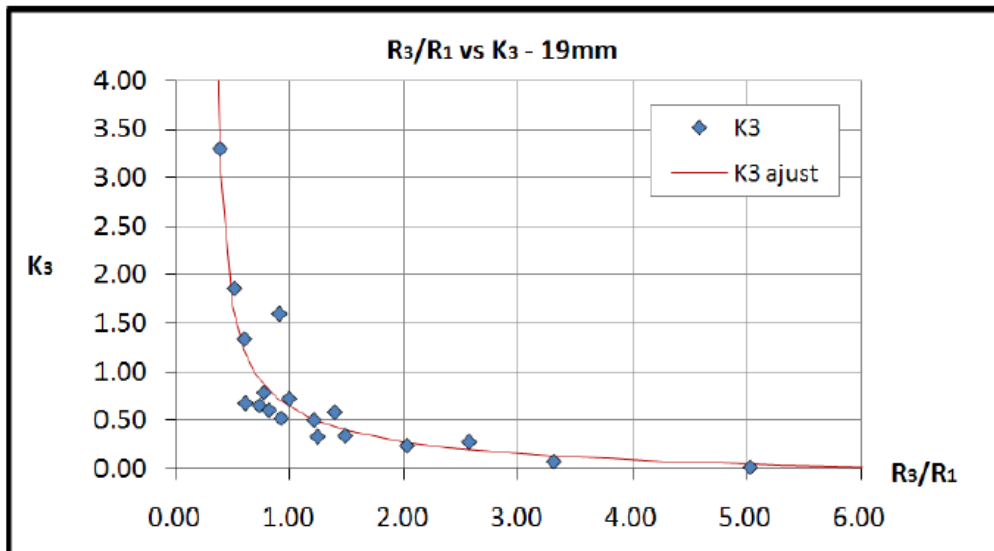


Figura 3.48 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruce de 19mm, [Patiño, 2011].

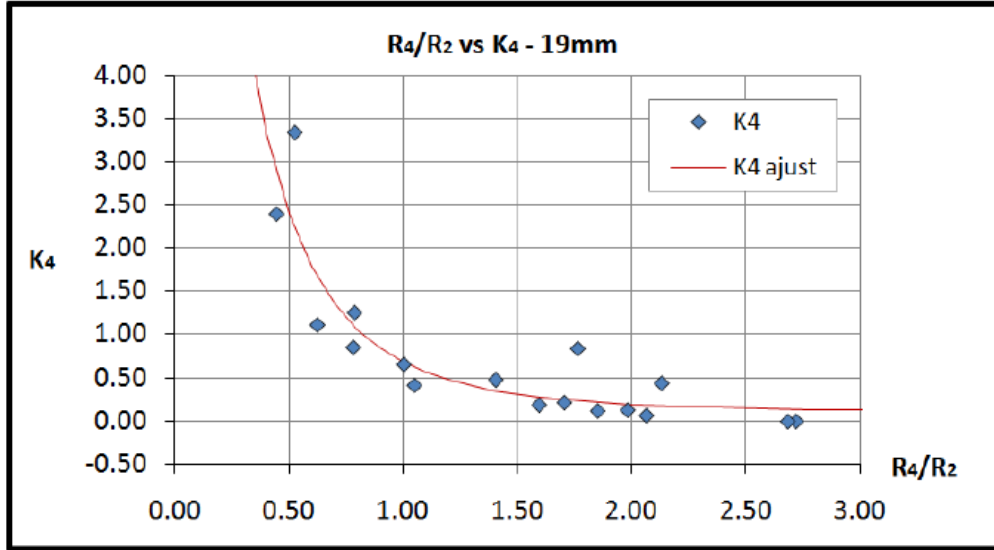


Figura 3.49 Gráficas de $Re4/Re2$ contra $K4$ para cruce de 19mm, [Patiño, 2011].

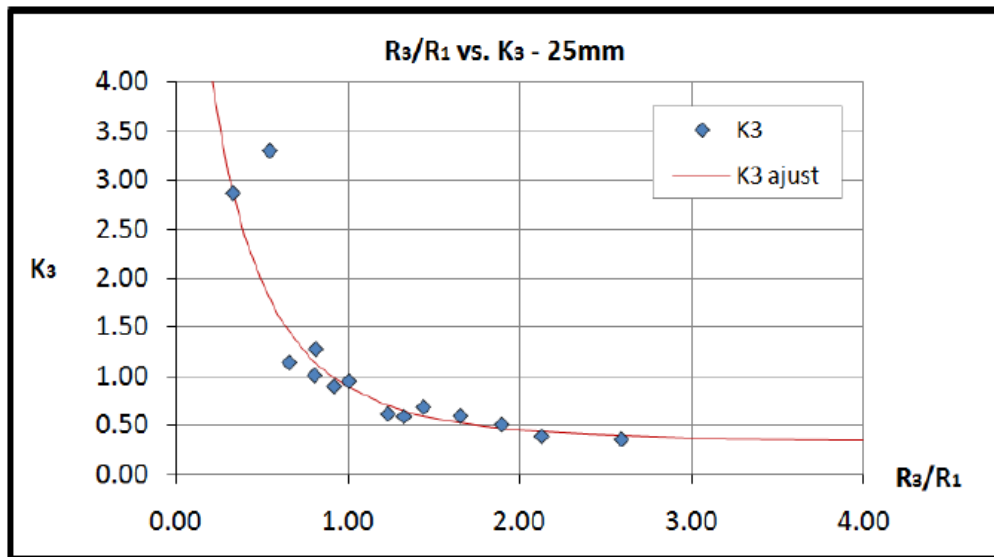


Figura 3.50 Gráficas de $Re3/Re1$ contra $K3$ para cruce de 25mm, [Patiño, 2011].

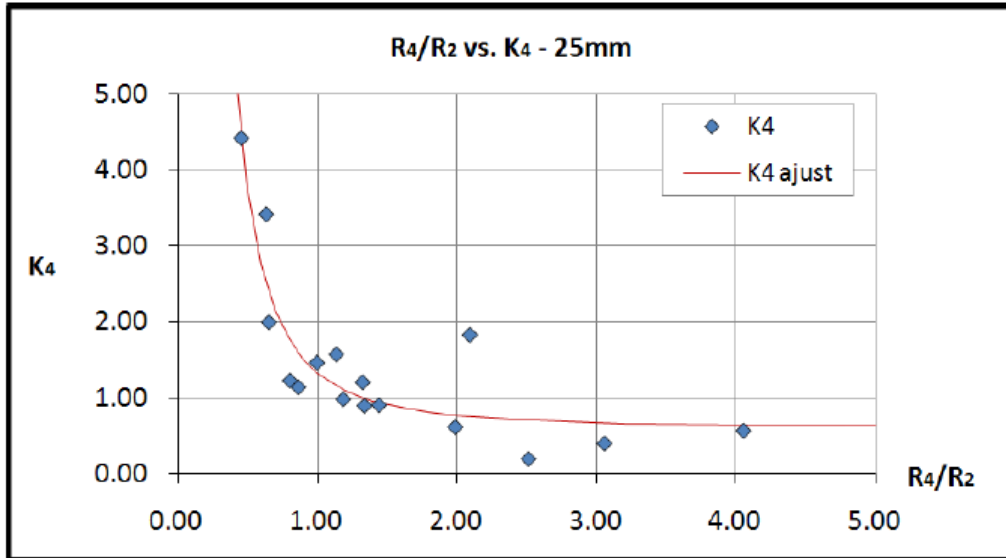


Figura 3.51 Gráficas de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruce de 25mm, [Patiño, 2011].

Tabla 3.22 Ecuaciones de ajuste para los coeficientes de pérdidas K para 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

<i>Diámetro</i>	<i>Coefficiente de pérdidas</i>	<i>Ecuación de mejor ajuste</i>	R^2
13 mm	K_3	$K_{3\text{ ajust}} = \frac{0.56}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} - 0.15\right)^{1.14}} - 0.06$	1.00
13 mm	K_4	$K_{4\text{ ajust}} = \frac{22.22}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 1.17\right)^{4.53}} + 0.53$	0.91
19 mm	K_3	$K_{3\text{ ajust}} = \frac{0.70}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} - 0.34\right)^{0.56}} - 0.24$	0.87
19 mm	K_4	$K_{4\text{ ajust}} = \frac{7.82}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 0.83\right)^{4.31}} + 0.10$	0.81

25 mm	K_3	$K_{3\text{ ajust}} = \frac{10.33}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 1.10\right)^{3.93}} + 0.33$	0.77
25 mm	K_4	$K_{4\text{ ajust}} = \frac{0.73}{\left(\frac{Re_4}{Re_1}\right)^{2.13}} + 0.60$	0.82

Continuación Tabla 3.22 Ecuaciones de ajuste para los coeficientes de pérdidas K para 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

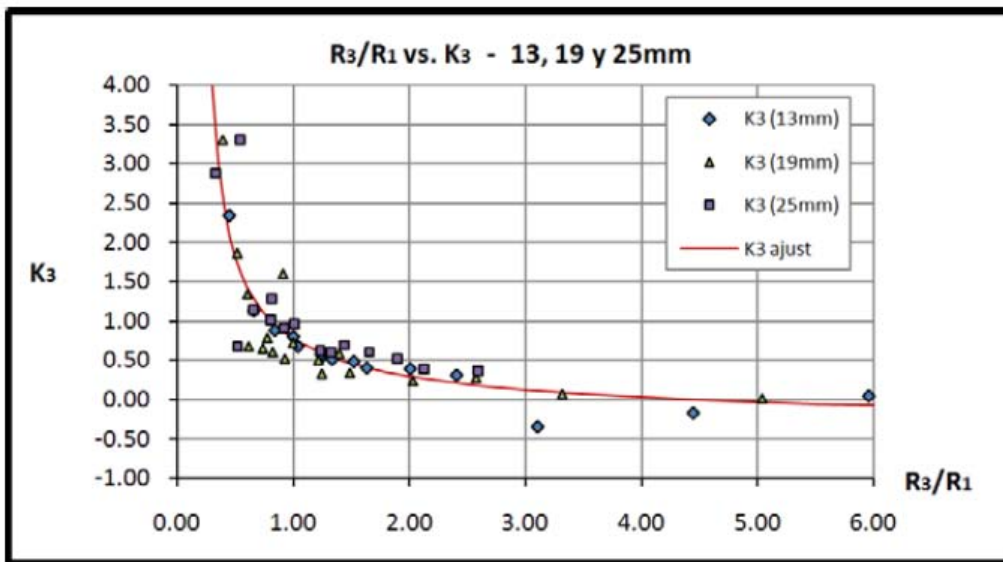


Figura 3.52 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruces de 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

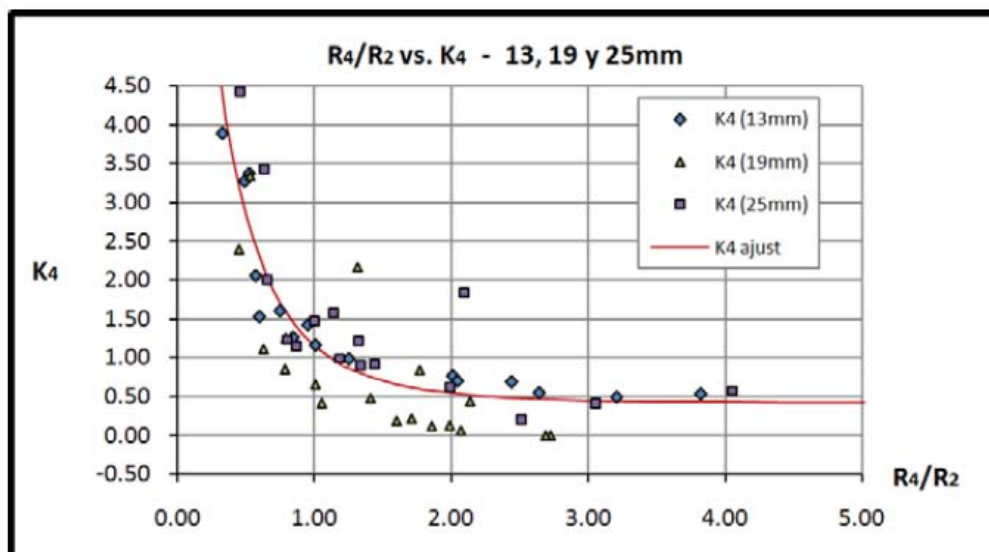


Figura 3.53 Gráficas de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruces de 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

Tabla 3.23 Ecuaciones de ajuste unificadas para los coeficientes de pérdidas K para 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R ²
13,19 y 25 mm	K ₃	$K_{3\text{ ajust}} = \frac{1.01}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} - 0.20\right)^{0.65}} - 0.39$	0.94
13,19 y 25 mm	K ₄	$K_{4\text{ ajust}} = \frac{42.05}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 1.30\right)^{4.86}} + 0.41$	0.74

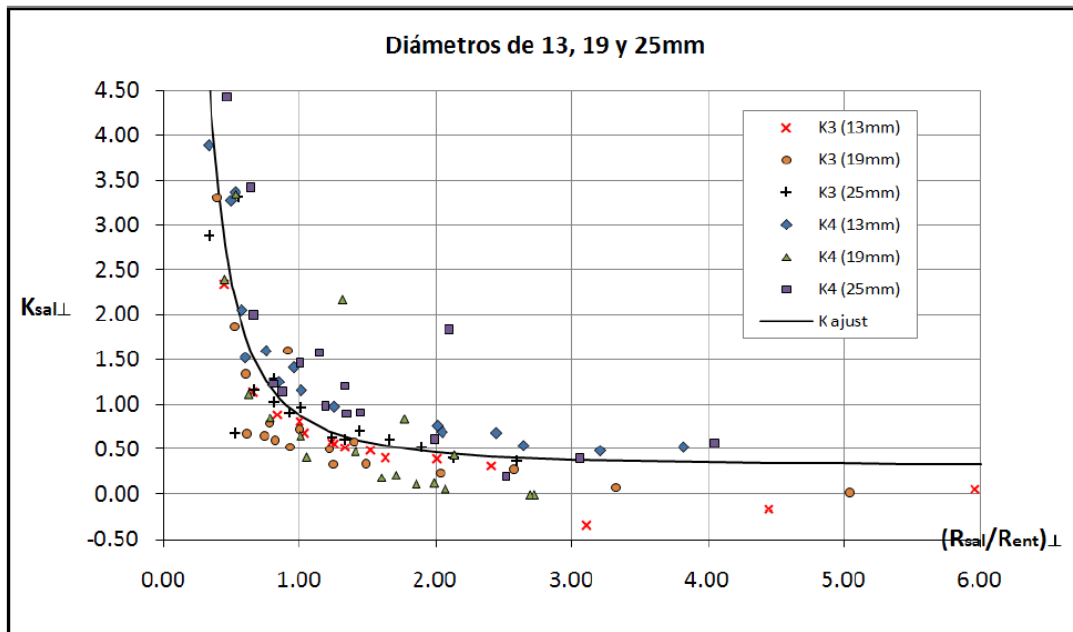


Figura 3.54 Gráficas de K3 y K4 unificadas para cruces de 13,19 y 25mm, [Patiño, 2011].

Tabla 3.24 Ecuación de ajuste unificada para el coeficientes de pérdidas K para 13, 19 y 25mm, [Patiño, 2011].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R ²
13,19 y 25 mm	K _{sal}	$K_{sal\pm} = \frac{0.558}{\left(\frac{Re_{sal}}{Re_{ent}} - 0.20\right)^{1.872}} - 0.323$	0.81

La M.I Irais Basurto Hernández, en la tesis nombrada “Pérdidas de energía en cruces de tuberías” (México Agosto 2014) investigo por medio de un modelo experimental el flujo dividido, el flujo perpendicular y el flujo opuesto en cruces de tuberías de PVC de distintos diámetros de 13, 19, 25, 32, 38 y 50mm. Como resultado, la autora obtuvo una serie de gráficas (basándose en el número de Reynolds tanto de entrada como de salida) de las que pueden deducirse ecuaciones de ajuste para así obtener los coeficientes K con una metodología muy similar a la de Patiño. En esta tesis se trabajó con un caso de flujo más, es decir, flujo dividido, flujo perpendicular y flujo encontrado.

La nomenclatura de los tramos de los cruces usada por el M.I. Basurto es la siguiente:

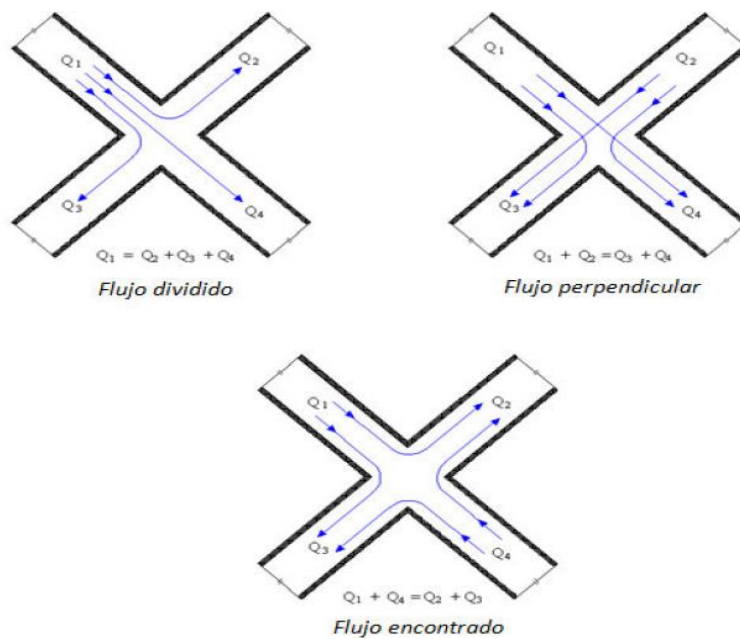


Figura 3.55 Nomenclatura asumida para los tramos en cruces de tuberías, [Basurto, 2013].

En las siguientes tablas se presentan las ecuaciones de ajuste para el caso 1 (flujo dividido o alimentación simple):

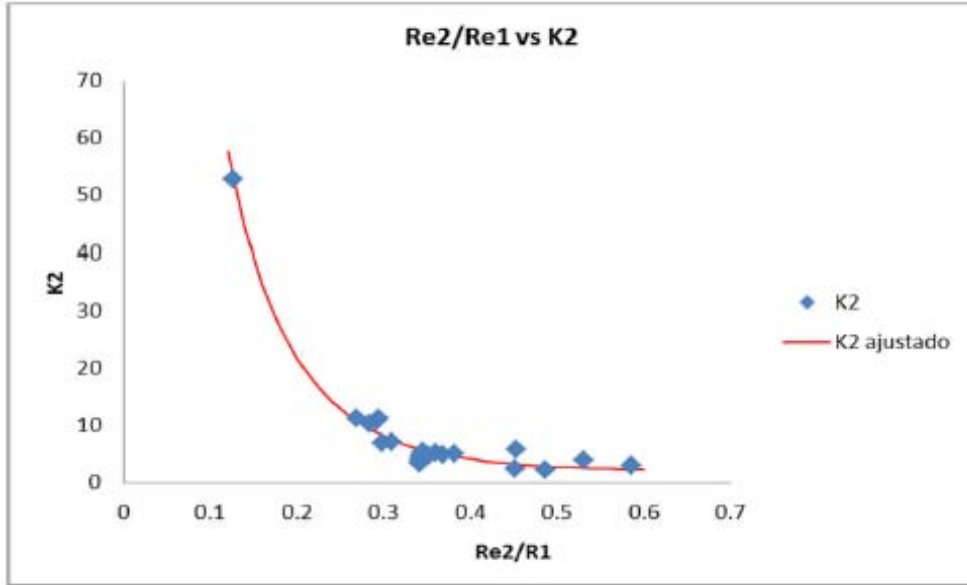


Figura 3.56 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

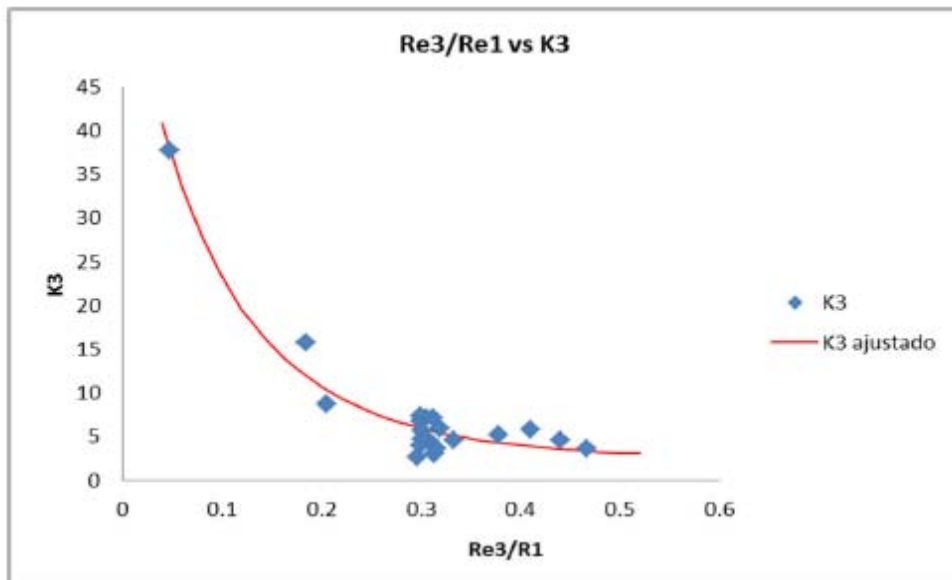


Figura 3.57 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

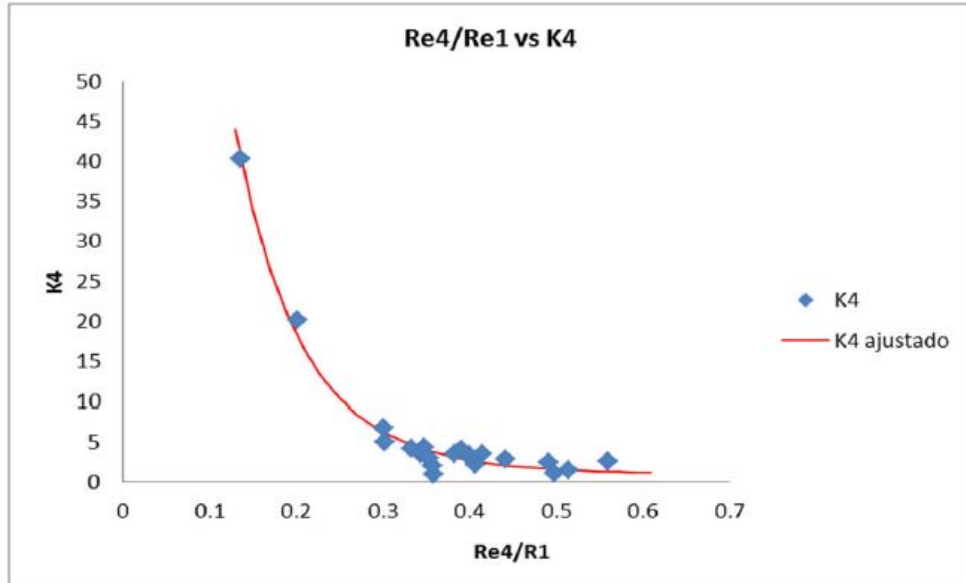


Figura 3.58 Gráfica de $Re4/Re1$ contra $K4$ para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

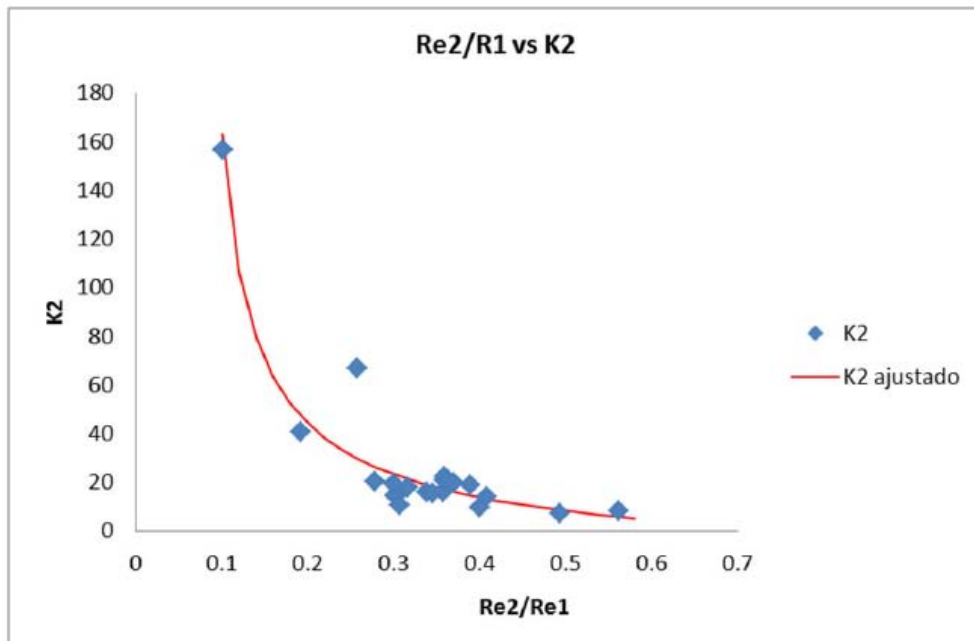


Figura 3.59 Gráfica de $Re2/Re1$ contra $K2$ para el cruce de 25mm, [Basurto, 2013].

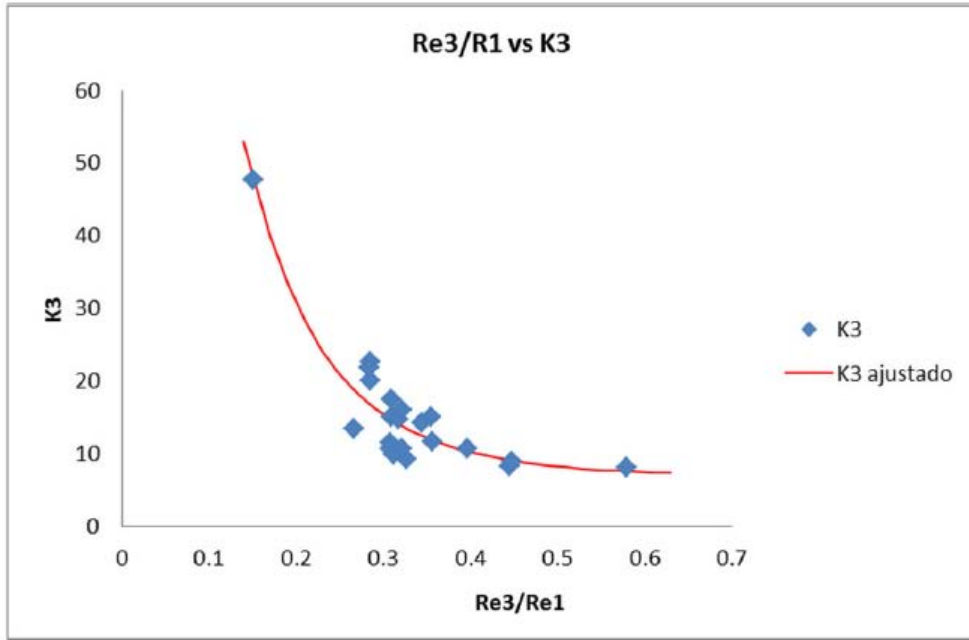


Figura 3.60 Gráfica de $Re3/Re1$ contra $K3$ para el cruce de 25mm, [Basurto, 2013].

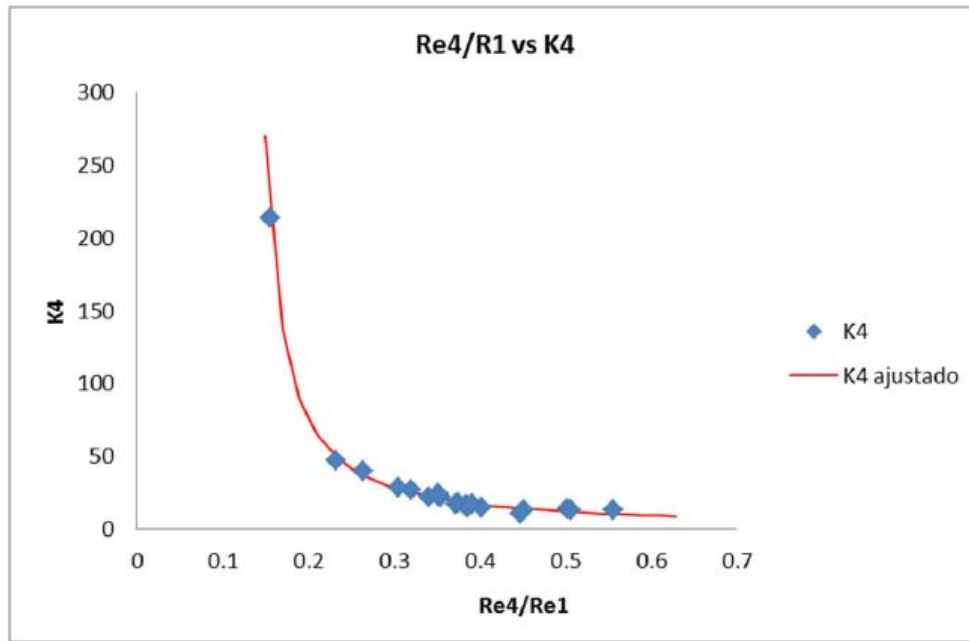


Figura 3.61 Gráfica de $Re4/Re1$ contra $K4$ para el cruce de 25mm, [Basurto, 2013].

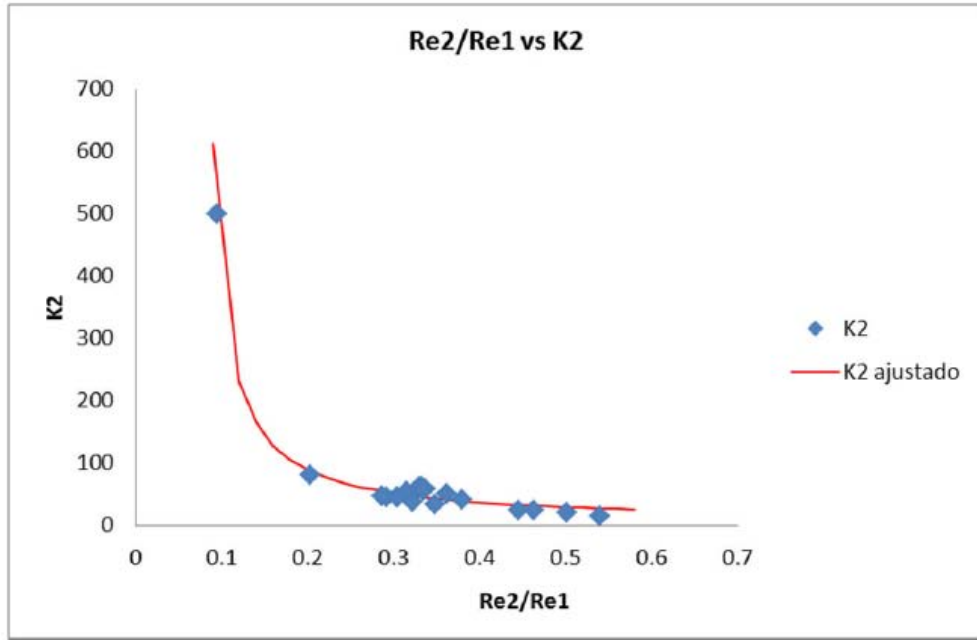


Figura 3.62 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 32mm, [Basurto, 2013].

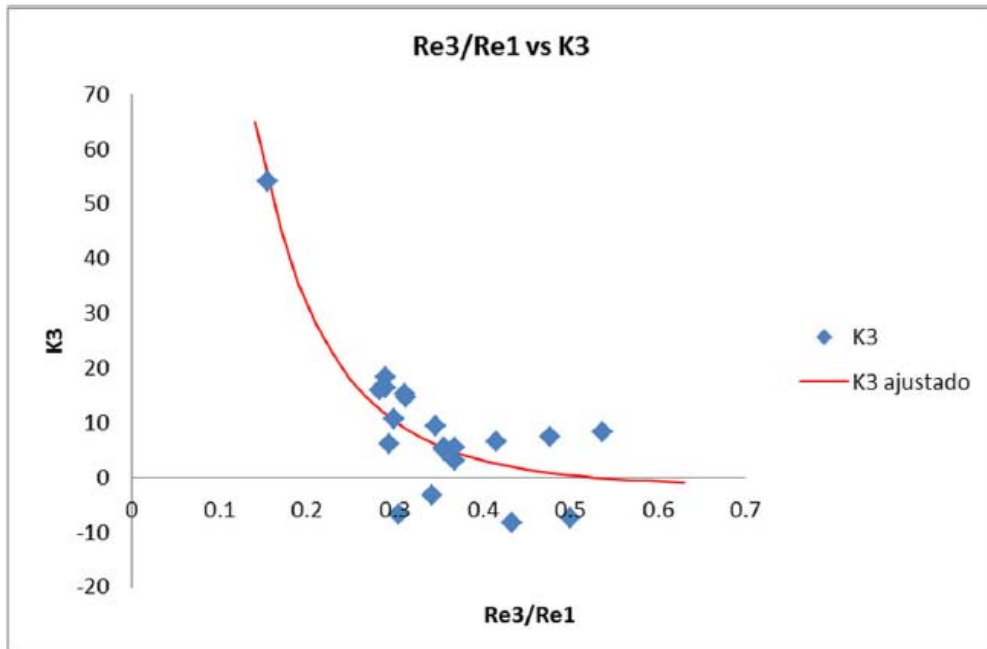


Figura 3.63 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 32mm, [Basurto, 2013].

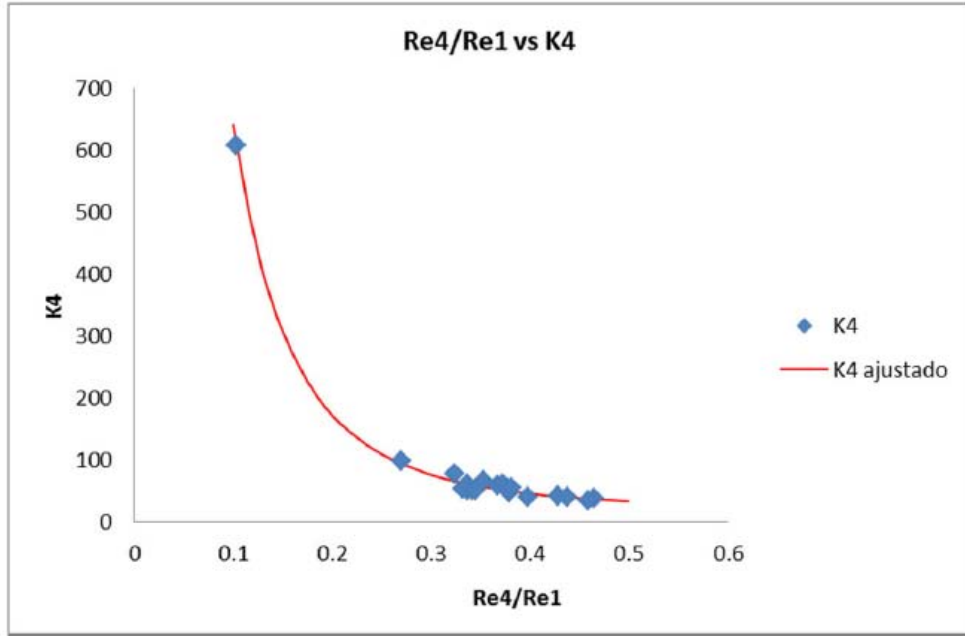


Figura 3.64 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 32mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.25 Ecuaciones de ajuste para flujo dividido, [Basurto, 2013].

Díámetro	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R^2
19 mm	K_2	$K_2 = \frac{5.381}{\left(\frac{Re_2}{Re_1} + 0.686\right)^{10.882}} + 1.979$	0.98
	K_3	$K_3 = \frac{5.426}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.748\right)^{8.232}} + 2.263$	0.94
	K_4	$K_4 = \frac{5.777}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 0.706\right)^{11.25}} + 0.878$	0.98
25 mm	K_2	$K_2 = \frac{14.801}{\left(\frac{Re_2}{Re_1} + 0.0714\right)^{0.705}} - 18.598$	0.91

	K_3	$K_3 = \frac{47.063}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.861\right)^{11.329}} + 6.789$	0.86
	K_4	$K_4 = \frac{3.342}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} - 0.123\right)^{1.210}} + 0.925$	0.99
32 mm	K_2	$K_2 = \frac{10.932}{\left(\frac{Re_2}{Re_1} - 0.072\right)^{0.999}} + 4.031$	0.98
	K_3	$K_3 = \frac{1.689}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.466\right)^{7.349}} - 1.766$	0.74
	K_4	$K_4 = \frac{2.29}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 0.104\right)^{3.529}} + 19.967$	0.99

Continuación Tabla 3.25 Ecuaciones de ajuste para flujo dividido, [Basurto, 2013].

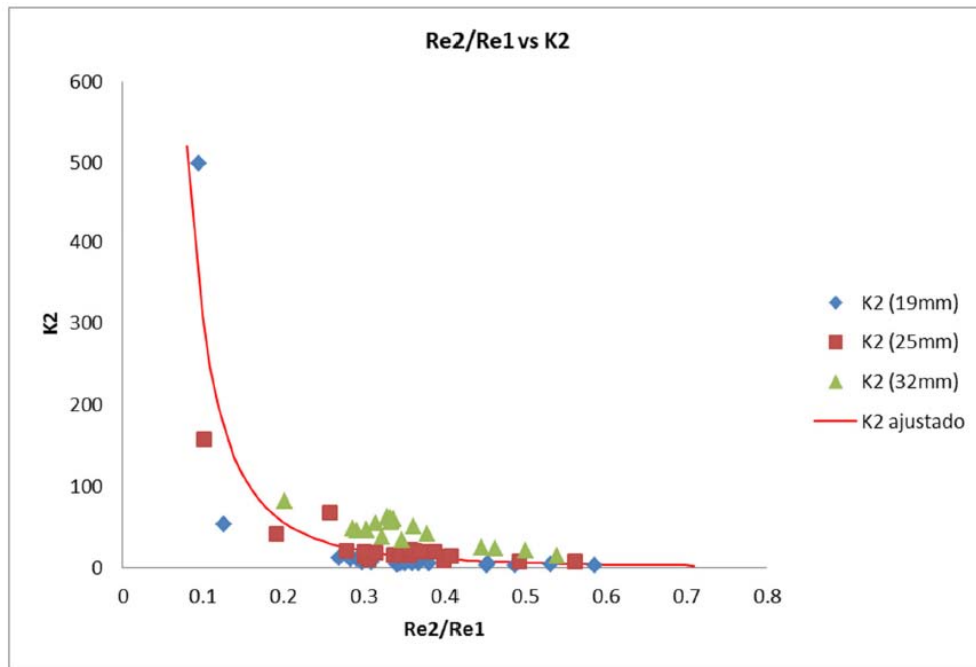


Figura 3.65 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 para los cruces de 19,25 y 32mm, [Basurto, 2013].

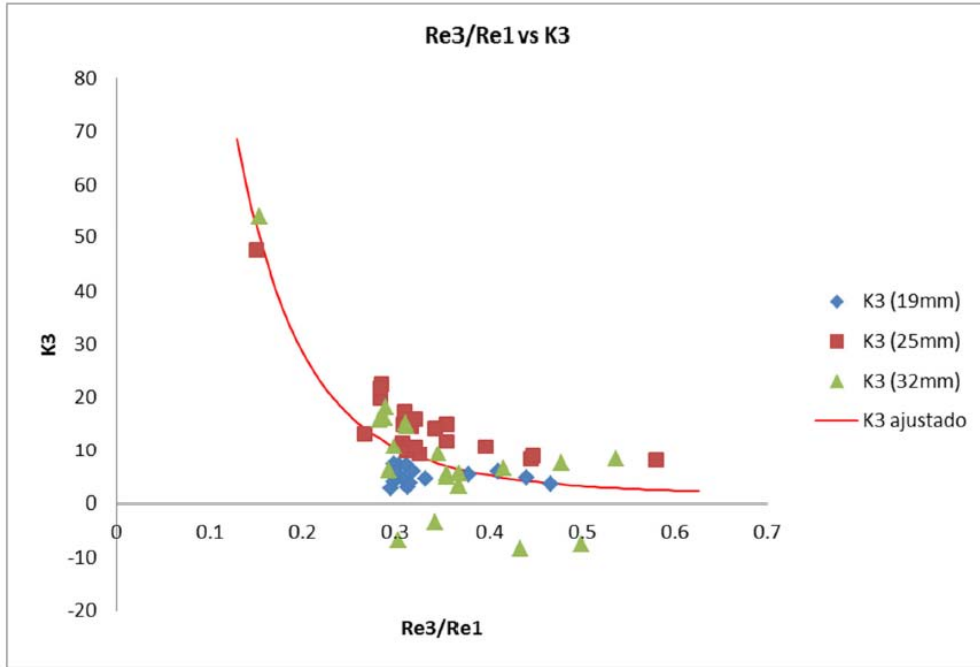


Figura 3.66 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para los cruces de 19,25 y 32mm, [Basurto, 2013].

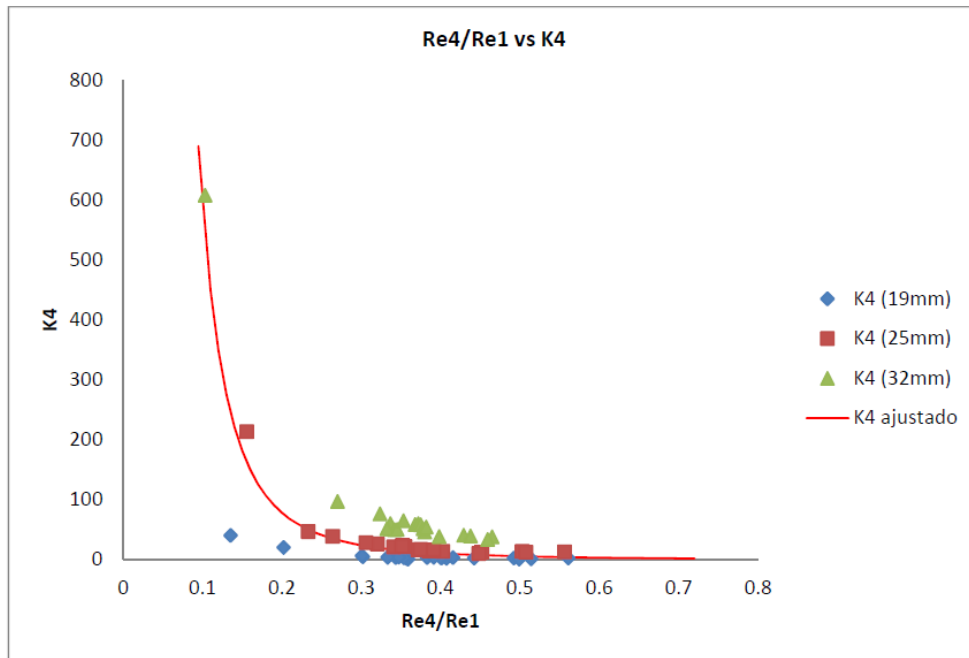


Figura 3.67 Gráficas de Re_4/Re_1 contra K_4 para los cruces de 19,25 y 32mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.26 Ecuaciones de ajuste para K2, K3 y K4 (Flujo dividido), [Basurto, 2013].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R ²
19, 25 y 32 mm	K ₂	$K_2 = \frac{1.115}{\left(\frac{Re_2}{Re_1}\right)^{2.433}}$	0.71
19, 25 y 32 mm	K ₃	$K_3 = \frac{0.374}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.25\right)^{5.372}} + 1.451$	0.66
19, 25 y 32 mm	K ₄	$K_4 = \frac{0.711}{\left(\frac{Re_4}{Re_1}\right)^{2.922}}$	0.79

En las siguientes tablas se presentan las ecuaciones de ajuste para el caso 2 (flujo perpendicular o alimentación doble):

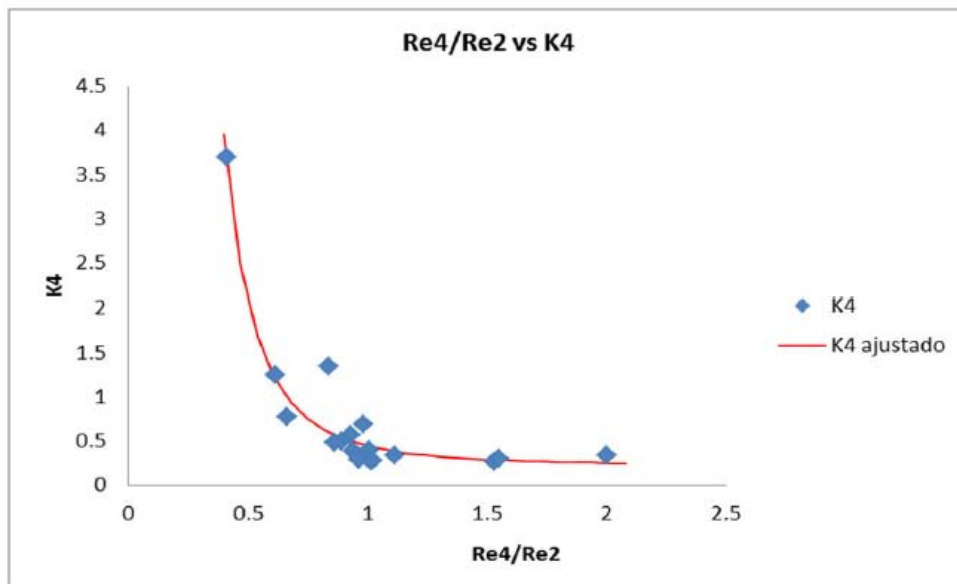


Figura 3.68 Gráfica de Re4/Re2 contra K4 para el cruce de 13mm, [Basurto, 2013].

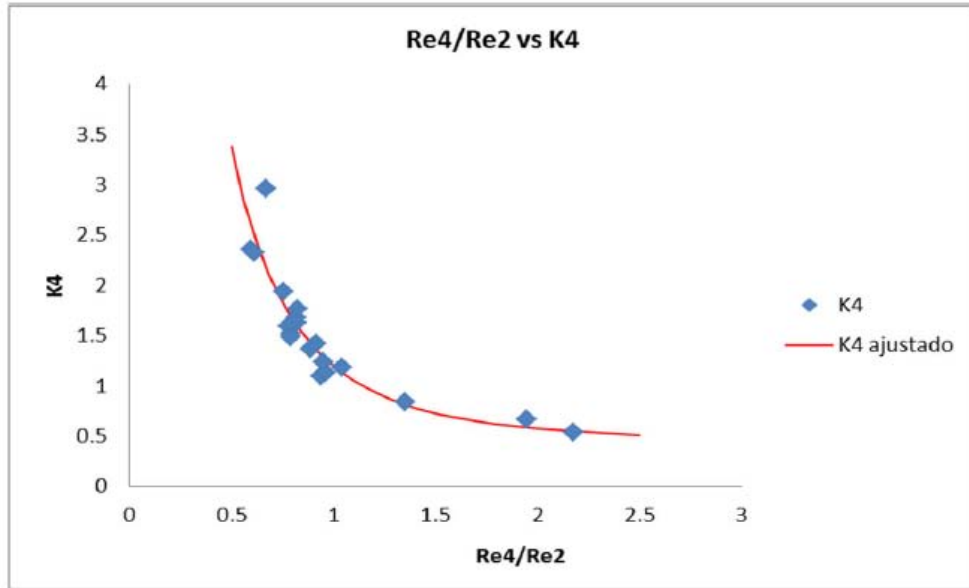


Figura 3.69 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

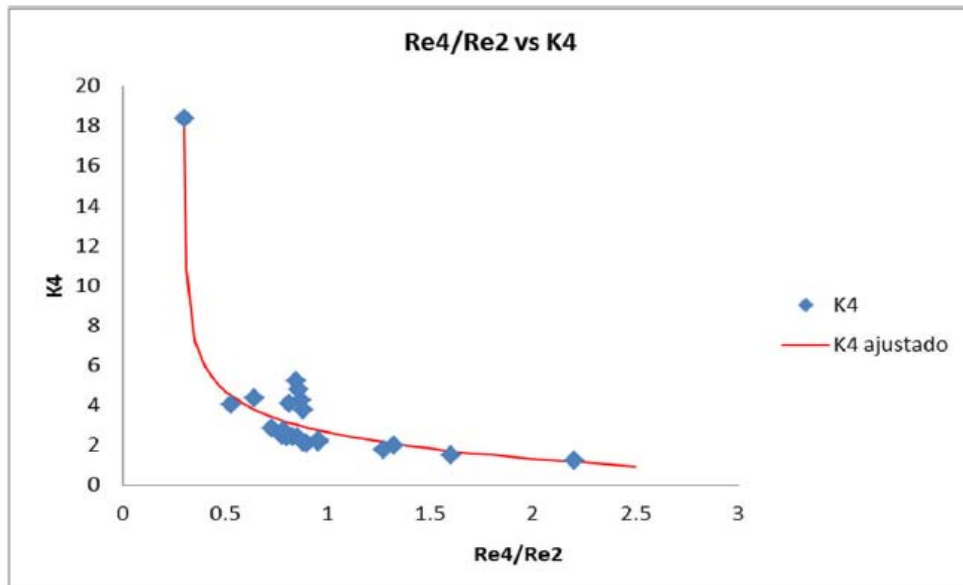


Figura 3.70 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25mm, [Basurto, 2013].

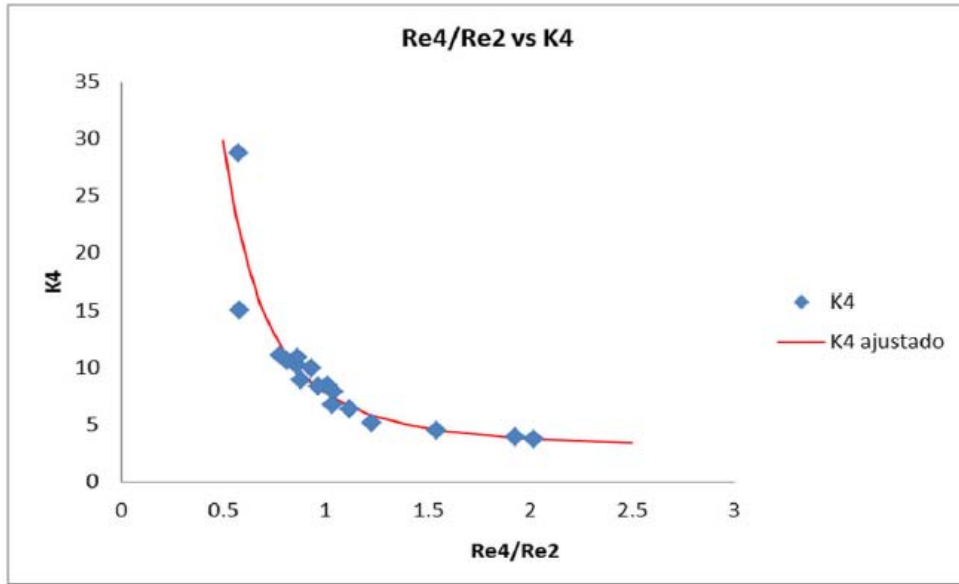


Figura 3.71 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32mm, [Basurto, 2013].

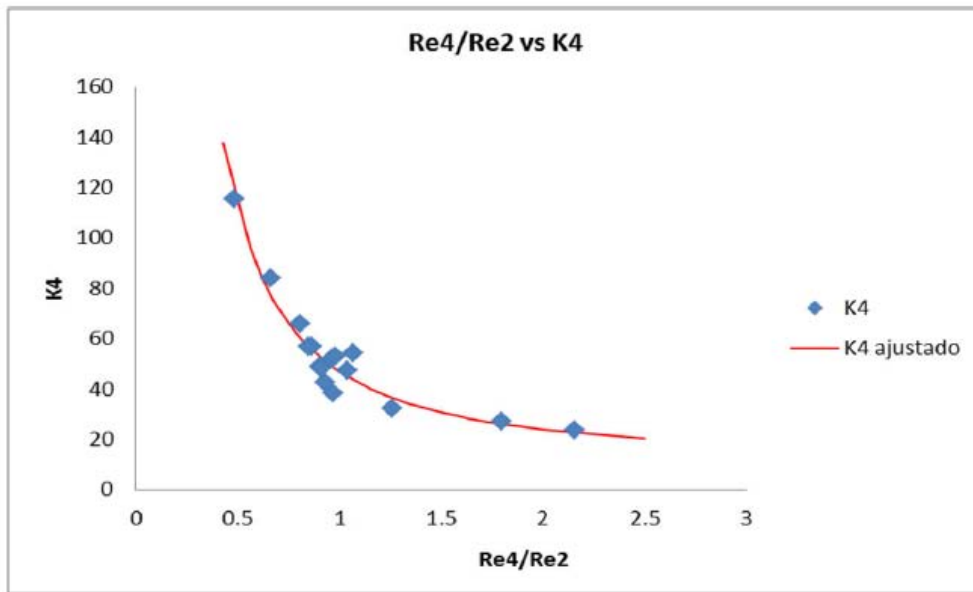


Figura 3.72 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.27 Ecuaciones de ajuste para flujo perpendicular, [Basurto, 2013].

Diámetro	Coficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R ²
13 mm	K ₄	$K_4 = \frac{0.215}{\left(\frac{Re_4}{Re_2} + 0.45\right)^{3.113}} + 0.229$	0.93
19 mm	K ₄	$K_4 = \frac{2.496}{\left(\frac{Re_4}{Re_2} + 0.45\right)^{3.176}} + 0.431$	0.85
25 mm	K ₄	$K_4 = \frac{2.190}{\left(\frac{Re_4}{Re_2} + 0.45\right)^{0.544}}$	0.93
32 mm	K ₄	$K_4 = \frac{4.920}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{2.453}} + 2.913$	0.82
50 mm	K ₄	$K_4 = \frac{35.482}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{1.502}} + 11.547$	0.93

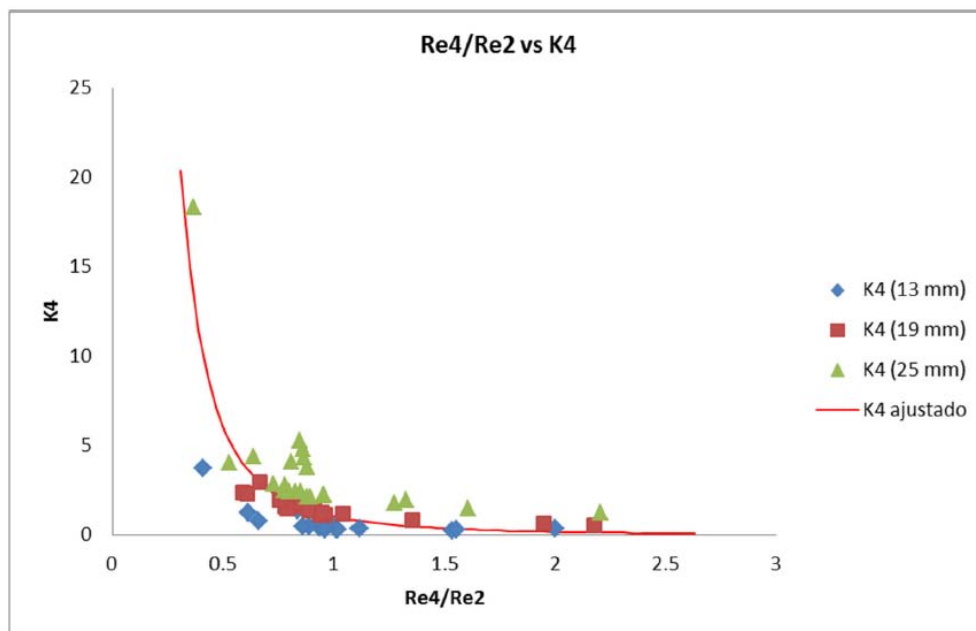


Figura 3.73 Gráfica de Re₄/Re₂ contra K₄ para cruces de 13, 19 y 25 mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.28 Ecuaciones de ajuste para K_4 (flujo perpendicular), [Basurto, 2013].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R^2
13, 19 y 25 mm	K_4	$K_4 = \frac{1.044}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{2.538}}$	0.60

En las siguientes figuras se presentan las ecuaciones de ajuste para el caso 3 (flujo encontrado):

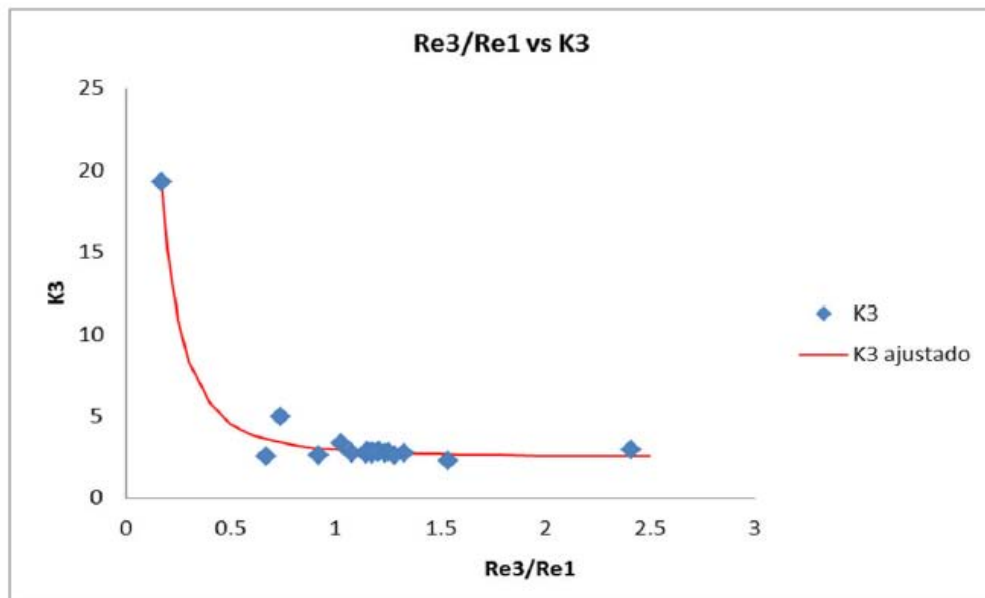


Figura 3.74 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 13mm, [Basurto, 2013].

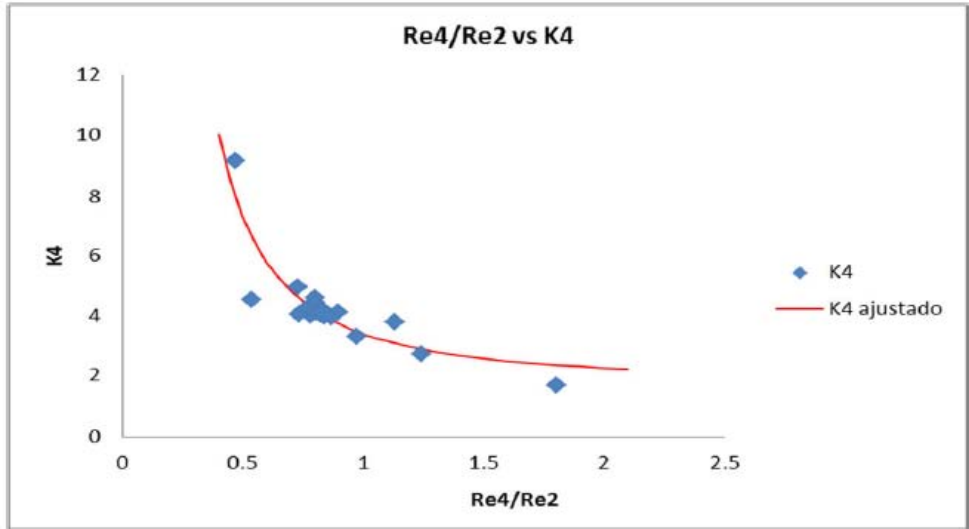


Figura 3.75 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 13mm, [Basurto, 2013].

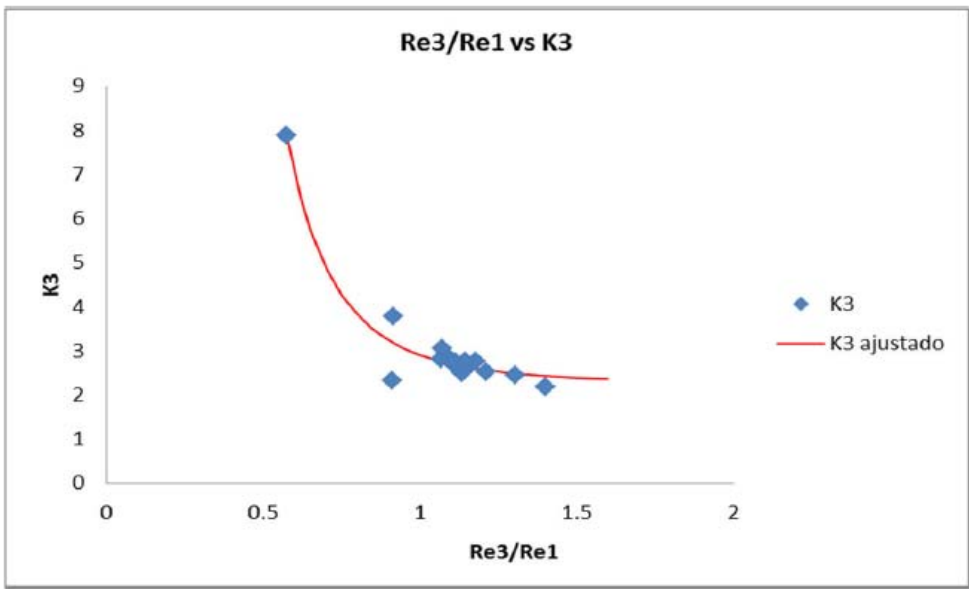


Figura 3.76 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

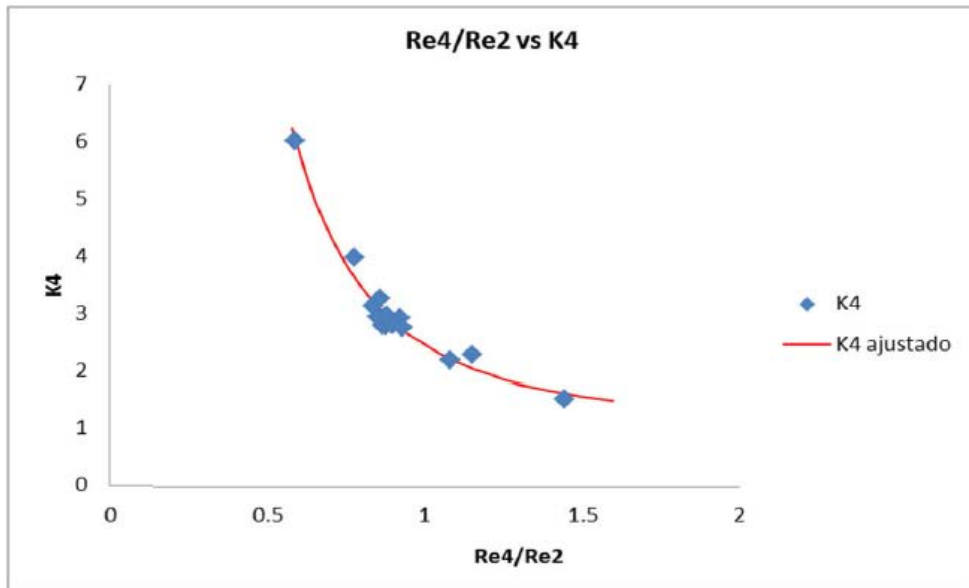


Figura 3.77 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19mm, [Basurto, 2013].

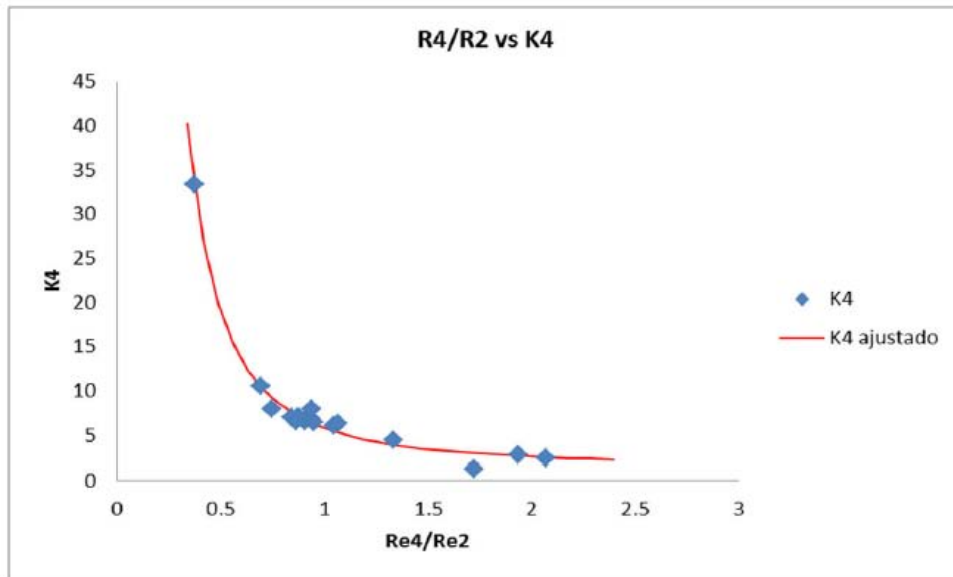


Figura 3.78 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25mm, [Basurto, 2013].

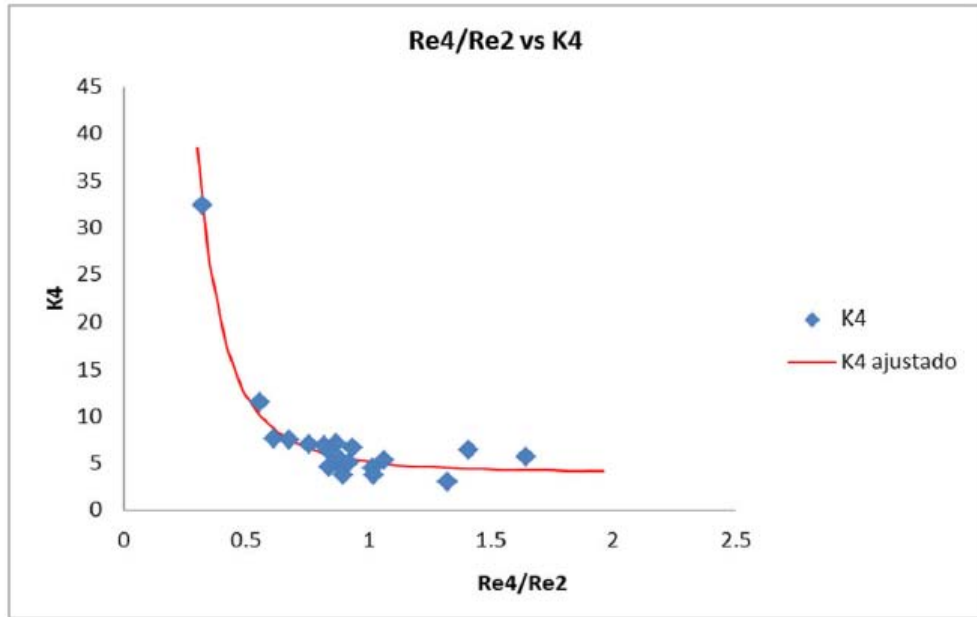


Figura 3.79 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32mm, [Basurto, 2013].

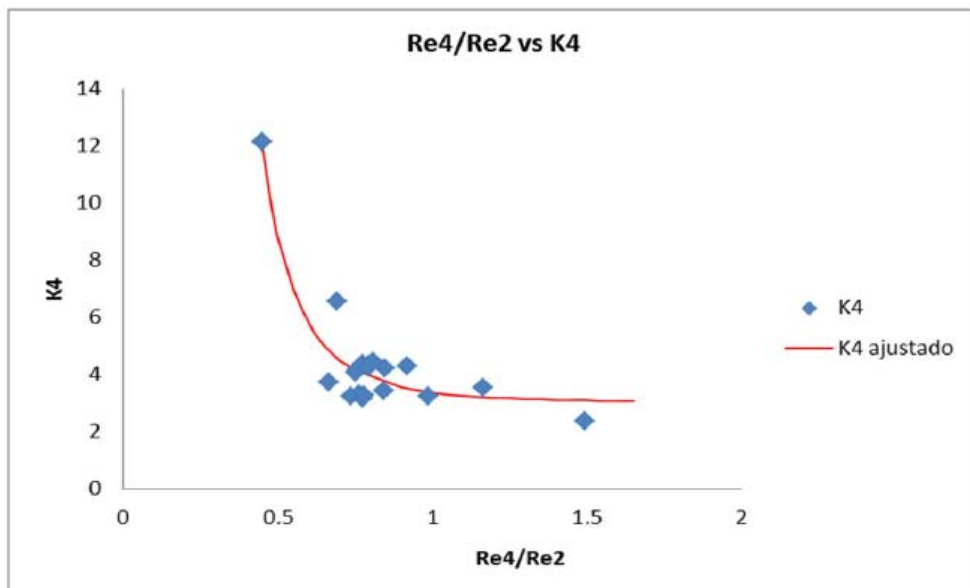


Figura 3.80 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 38mm, [Basurto, 2013].

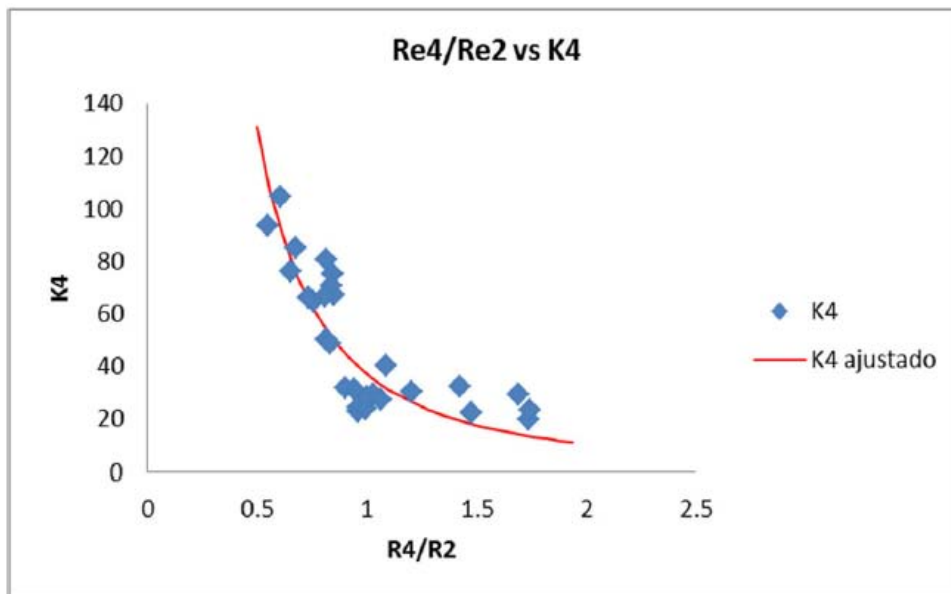


Figura 3.81 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.29 Ecuaciones de ajuste para flujo perpendicular, [Basurto, 2013].

Diámetro	Coficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R^2
13 mm	K_3	$K_3 = \frac{0.512}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.069\right)^{2.444}} + 2.538$	0.98
	K_4	$K_4 = \frac{1.603}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{1.789}} + 1.789$	0.77
19 mm	K_3	$K_3 = \frac{0.656}{\left(\frac{Re_3}{Re_1}\right)^{3.881}} + 2.254$	0.95
	K_4	$K_4 = \frac{1.429}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{2.375}} + 1.022$	0.97
25 mm	K_4	$K_4 = \frac{4.237}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{2.048}} + 1.614$	0.98

32 mm	K_4	$K_4 = \frac{1.160}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{2.818}} + 4.004$	0.96
38 mm	K_4	$K_4 = \frac{0.346}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{4.083}} + 3.029$	0.86
50 mm	K_4	$K_4 = \frac{37.278}{\left(\frac{Re_4}{Re_2}\right)^{1.818}}$	0.75

Continuación Tabla 3.29 Ecuaciones de ajuste para flujo perpendicular, [Basurto, 2013].

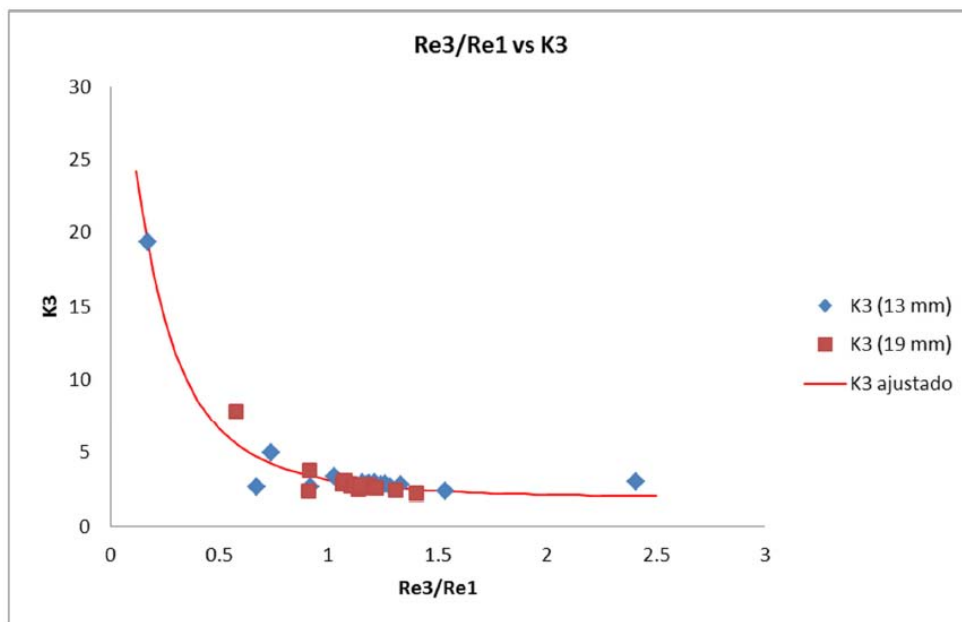


Figura 3.82 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para los cruces de 13 y 19mm, [Basurto, 2013].

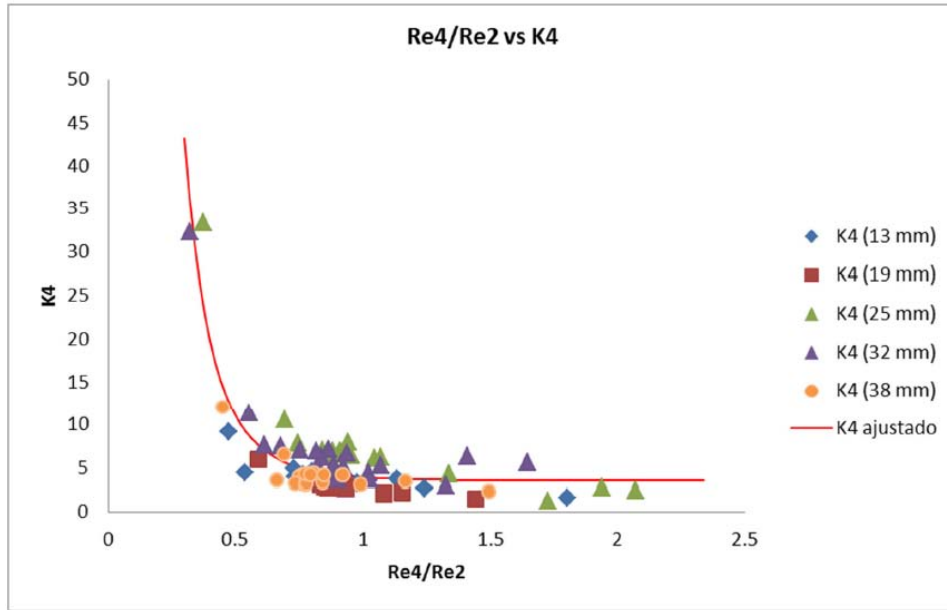


Figura 3.83 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para los cruces de 13, 19, 25, 32 y 38mm, [Basurto, 2013].

Tabla 3.30 Ecuaciones de ajuste para K_3 y K_4 (flujo encontrado), [Basurto, 2013].

Diámetro	Coefficiente de pérdidas	Ecuación de mejor ajuste	R^2
13 y 19 mm	K_3	$K_3 = \frac{6.083}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} + 0.572\right)^{3.541}} + 1.891$	0.95
13, 19, 25, 32 y 38 mm	K_4	$K_4 = \frac{2.338}{\left(\frac{Re_4}{Re_2} + 0.319\right)^{5.914}} + 3.546$	0.80

3.3 Apéndice.

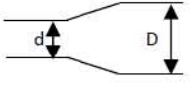
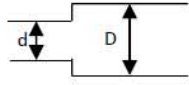
Tabla 3.1 Coeficiente de pérdida local "K" para diferentes accesorios, [Hurtado, 2013].

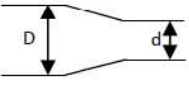
Accesorio: Codos	K
Hierro fundido (diámetro: 50-1200mm)	
Codo a 90°	0.40
Codo a 45°	0.20
Acero soldado (diámetro: 50-400 mm)	
Codo a 90° de radio corto	0.40
Codo a 45° de radio corto	0.20
Codo a 90° de radio largo	0.35
Codo a 45° de radio largo	0.17
PVC	
Codo a 90° (diámetro: 1/2" – 8")	1.25
Codo a 45° (diámetro: 1/2" – 8")	0.50
Codo a 90° de radio largo (diámetro: 1/2" – 4")	0.45
Codo a 45° de radio largo (diámetro: 1/2" – 4")	0.25
Codo a 90° de radio largo (diámetro: 150-600mm)	0.30
Codo a 45° de radio largo (diámetro: 150-600mm)	0.15
Codo a 22.5° de radio largo (d: 150-600mm)	0.10
Codo a 11.25° de radio largo (d: 150-600mm)	0.05
Acero roscado (diámetro: 1/2" – 6")	
Codo a 90°	1.25
Codo a 45°	0.50
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0.90
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0.75
Accesorio: Válvulas	K
Esférica – totalmente abierta	10
En ángulo recto- totalmente abierta	5
De seguridad – totalmente abierta	2.5
De retención – totalmente abierta	2
De mariposa- totalmente abierta	0.3
De mariposa – 3/4 abierta	2.5
De mariposa – 1/2 abierta	14.5
De mariposa – 1/4 abierta	150
De compuerta – totalmente abierta	0.2
De compuerta – 3/4 abierta	1.15
De compuerta – 1/2 abierta	5.6
De compuerta – 1/4 abierta	24

Continuación Tabla 3.1 Coeficiente de pérdida local "K" para diferentes accesorios, [Hurtado, 2013].

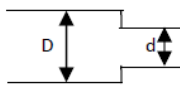
Accesorio: Codos	K
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0.60
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0.45
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0.40
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0.35

Accesorio: Entrada	K
Orillas afiladas	0.5
Tubo proyectado hacia adentro	0.8
Orilla ligeramente redondeada	0.25
Campana proyectada hacia adentro	0.2
Orilla completamente redondeada	0.1

Accesorio: Ampliación	d/D	K
Ampliación Gradual		
	0.5	0.75
	0.6	0.5
	0.7	0.25
	0.8	0.10
	0.9	0
Ampliación súbita		
	0.2	1.0
	0.35	0.8
	0.5	0.6
	0.65	0.35
	0.8	0.15
Ensanchamiento brusco		$\left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right]^2$

Accesorio: Reducción	d/D	K
Reducción Gradual		
	0.5	0.2
	0.6	0.17
	0.7	0.1
	0.8	0.05
	0.9	0

Continuación Tabla 3.1 Coeficiente de pérdida local "K" para diferentes accesorios, [Hurtado, 2013].

Accesorio: Reducción	d/D	K
	0.5	0.5
	0.6	0.45
	0.7	0.35
	0.8	0.2
Reducción brusca de sección (contracción)		$0.5 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2$

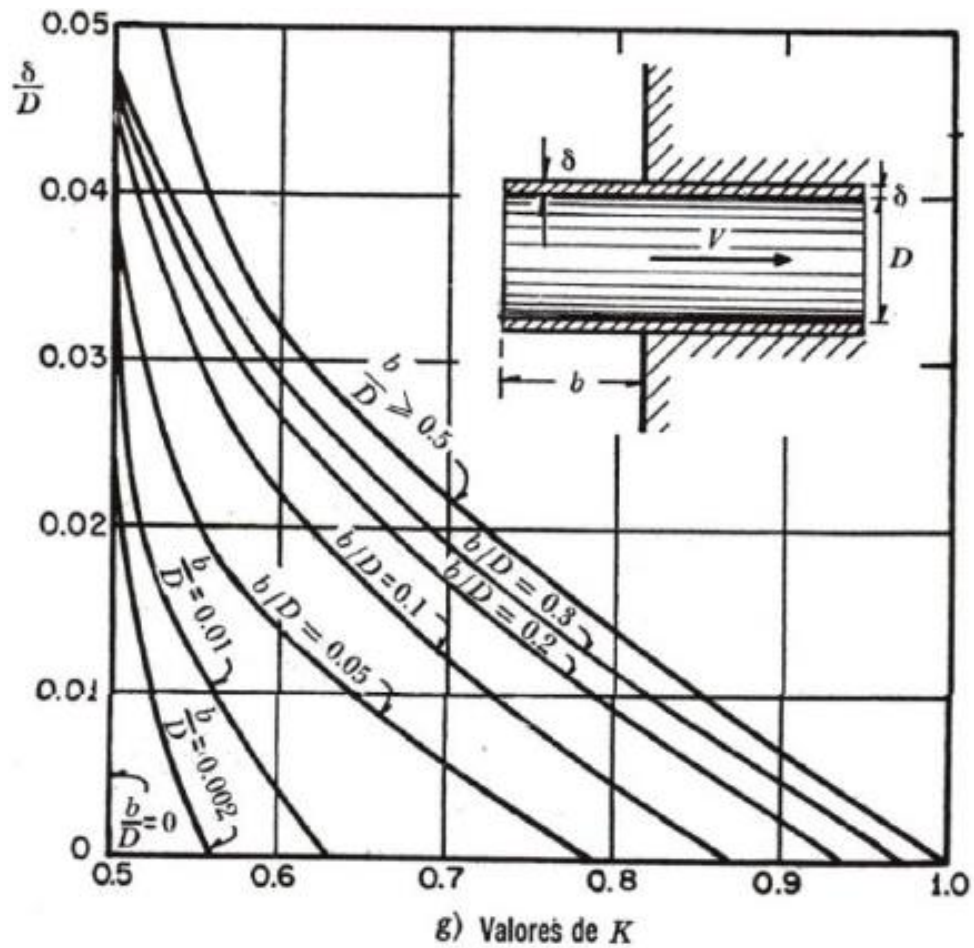


Figura 3.3 Coeficientes de pérdida por entrada, [Sotelo, 1991].

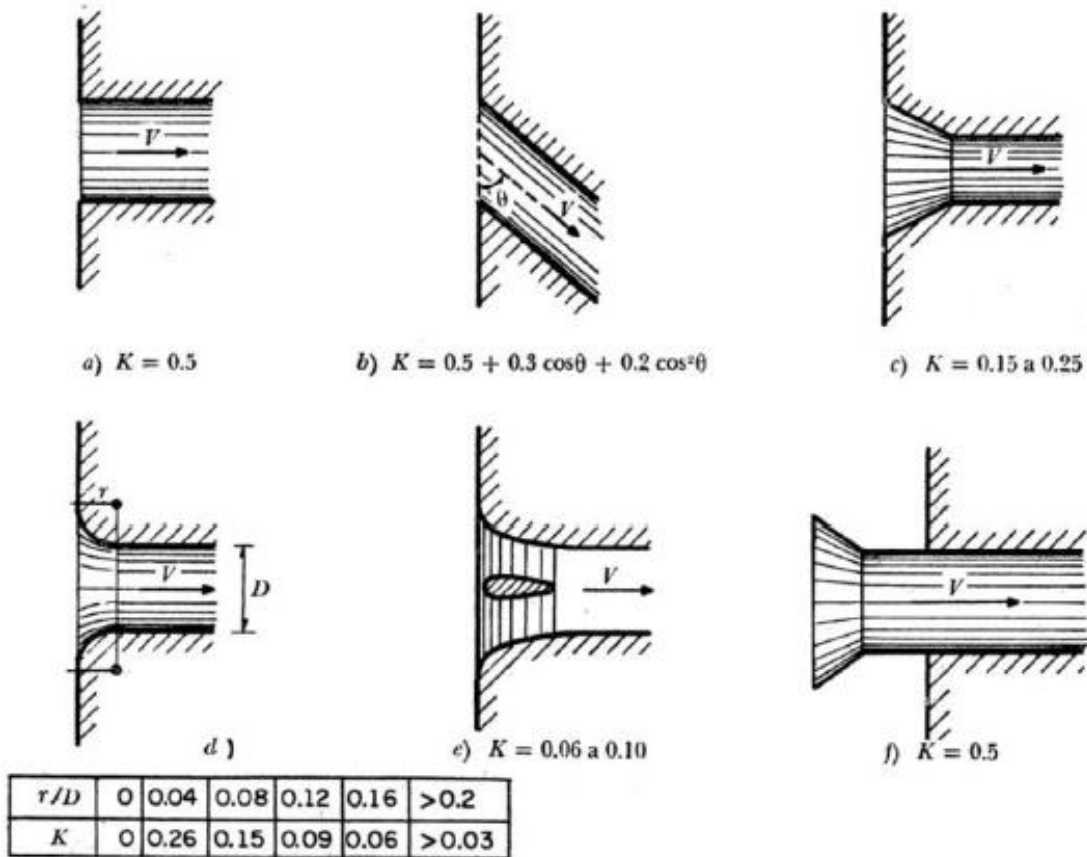


Figura 3.4 Esquemas de distintos tipos de entradas, [Sotelo, 1991].

Pérdidas locales por rejillas.

Para el cálculo de pérdidas de locales por rejillas se puede utilizar la ecuación de Creager (3.2), con esta se obtiene una aproximación media del coeficiente K .

$$K = 1.45 - 0.45 \left(\frac{A_n}{A_b} \right) - \left(\frac{A_n}{A_b} \right)^2 \quad (3.2)$$

Dónde:

A_n es el área neta de paro entre rejillas.

A_b es el área bruta de la estructura de rejillas.

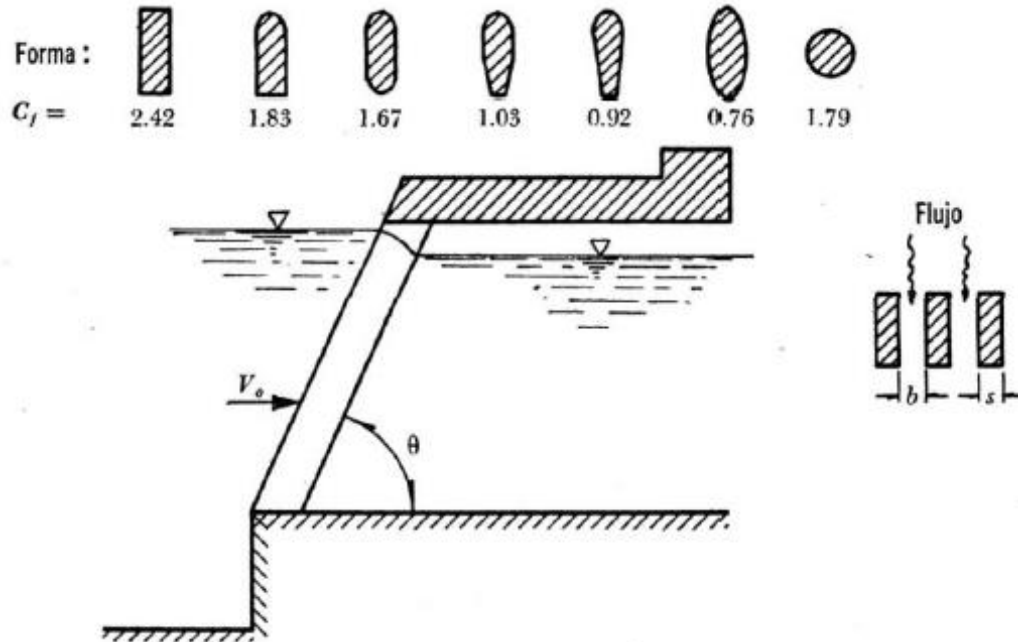


Figura 3.5 Disposición de una rejilla, [Sotelo, 1991].

Pérdidas locales por ampliación (brusca y gradual).

El coeficiente K depende de la brusquedad de la ampliación, así que usando la ecuación de Borda-Carnot (3.3), [Sotelo, 1991].

$$h_L = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

Se obtiene que:

$$K = C_a \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \quad (3.4)$$

Dónde:

C_a depende del ángulo θ del difusor como se muestra en la gráfica 2.

Para ampliaciones bruscas se usa la misma fórmula (3.4) con $C_a = 1$.

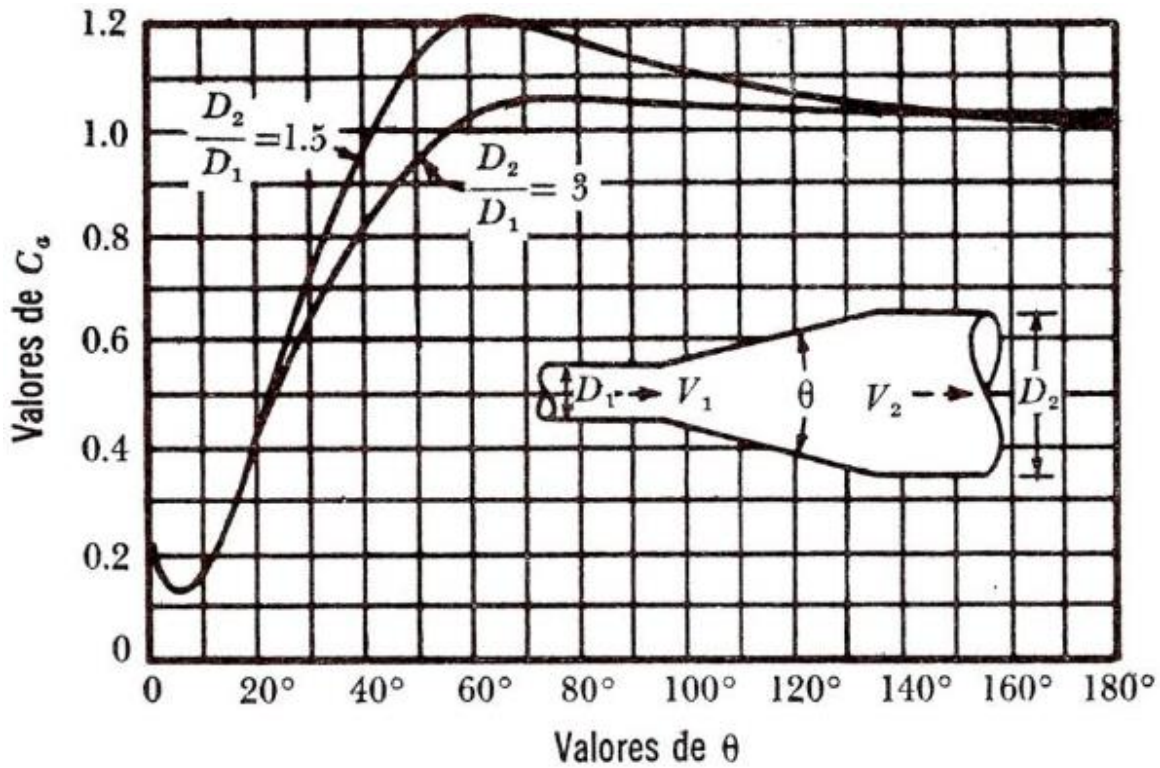


Figura 3.6 Coeficiente de pérdida para ampliaciones graduales, [Sotelo, 1991].

De la fórmula de Borda-Carnot se obtiene la siguiente expresión:

$$h_L = K \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad (3.5)$$

Dónde:

V_1 es la velocidad correspondiente al tramo con diámetro D_1 .

V_2 es la velocidad correspondiente al tramo con diámetro D_2 .

Tabla 3.2 Valores de coeficiente K para ampliación gradual, [Patiño, 2011].

Ampliación gradual	
Θ	Coeficiente K
2°	0.033
4°	0.039
6°	0.046
8°	0.055
10°	0.078
12°	0.10
15°	0.16
20°	0.31
30°	0.49
40°	0.60
50°	0.67
60°	0.72
75°	0.72
90°	0.67

Tabla 3.3 Valores de coeficiente K para ampliación brusca, [Patiño, 2011].

<i>Ampliación brusca</i>		
D1/D2	Coeficiente K	
	V1= 0.6 m/s	V1=18 m/s
1.00	0.00	0.00
0.83	0.11	0.08
0.71	0.26	0.20
0.63	0.40	0.32
0.56	0.51	0.40
0.50	0.60	0.47
0.40	0.74	0.58
0.33	0.83	0.65
0.25	0.92	0.72
0.20	0.96	0.75

Tabla 3.4 Coeficientes de pérdida por reducción del ángulo, según Kisieliev, [Sotelo, 1991].

θ	4° a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°
K	0.060												
	0.005	0.16	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35

Con la finalidad de evitar pérdidas grandes, el ángulo de reducción no debe exceder de un valor especificado, dicho ángulo vale:

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{gD}{V}} \quad (3.6)$$

Dónde:

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3.7) \quad \text{y} \quad V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.8)$$

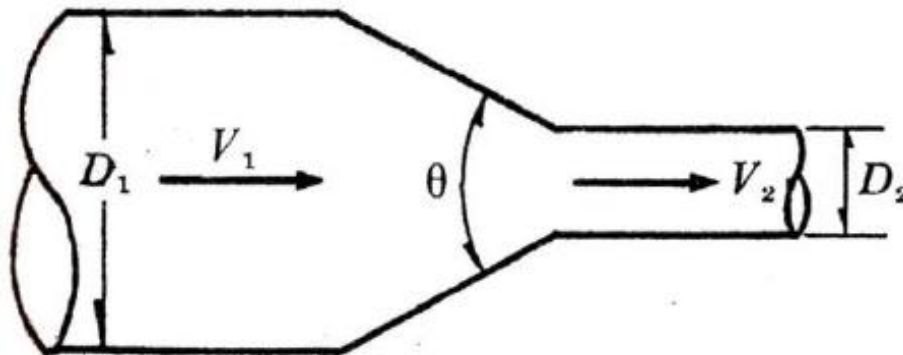


Figura 3.7 Reducción gradual, [Sotelo, 1991].

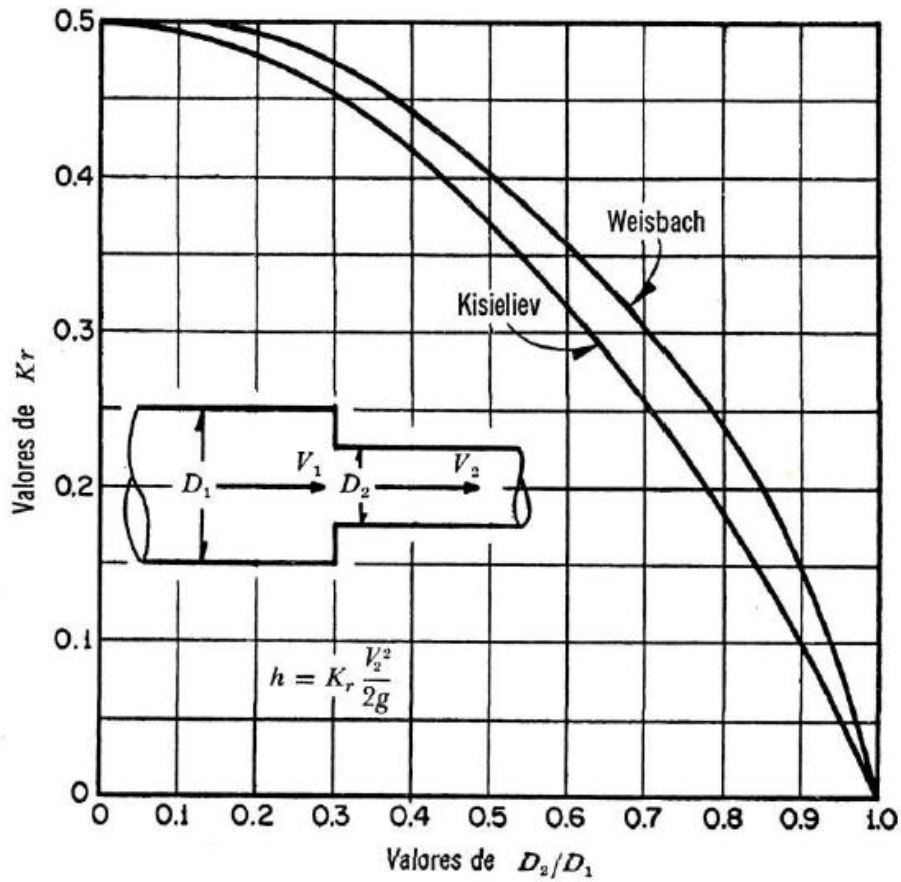


Figura 3.8 Pérdida de energía en una contracción brusca, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.5 Valores de coeficiente K para reducción brusca, [Patiño, 2011].

Reducción Brusca		
Coeficiente K		
D1/D2	V1= 0.6 m/s	V1= 18 m/s
1.00	0.00	0.00
1.20	0.11	0.07
1.40	0.20	0.17
1.60	0.26	0.24
1.80	0.34	0.27
2.00	0.38	0.29
2.50	0.42	0.31
3.00	0.44	0.33
4.00	0.47	0.34
5.00	0.48	0.35

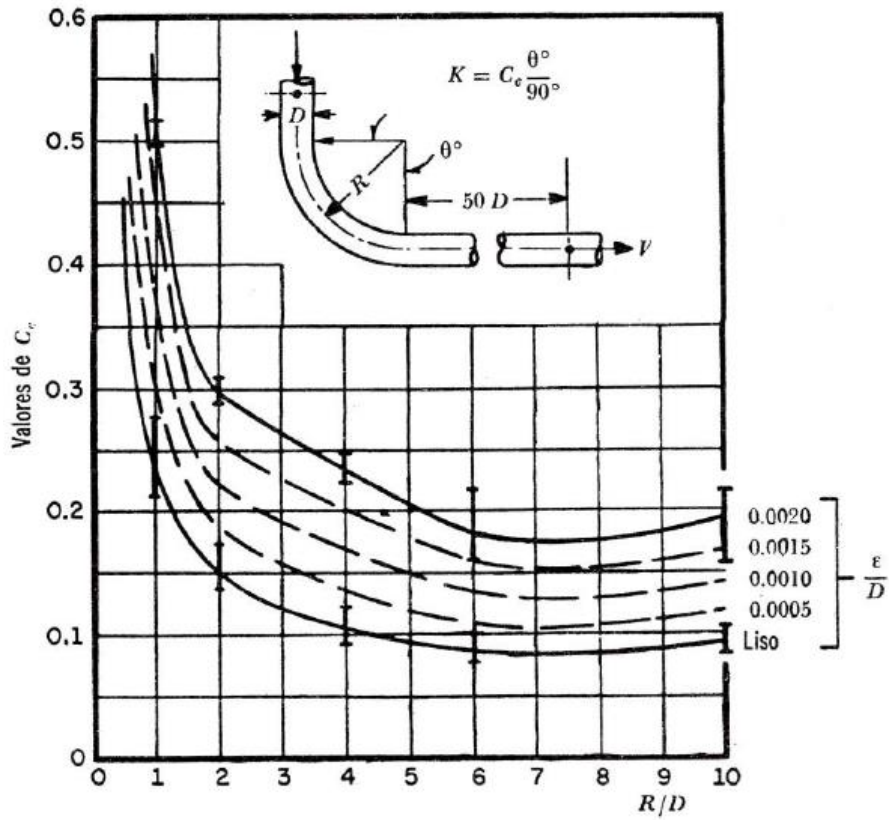


Figura 3.9 Coeficientes de C_c para curvas de diámetro constante y $Re > 2.2 \times 10^5$ en tubos rugosos, [Sotelo, 1991].

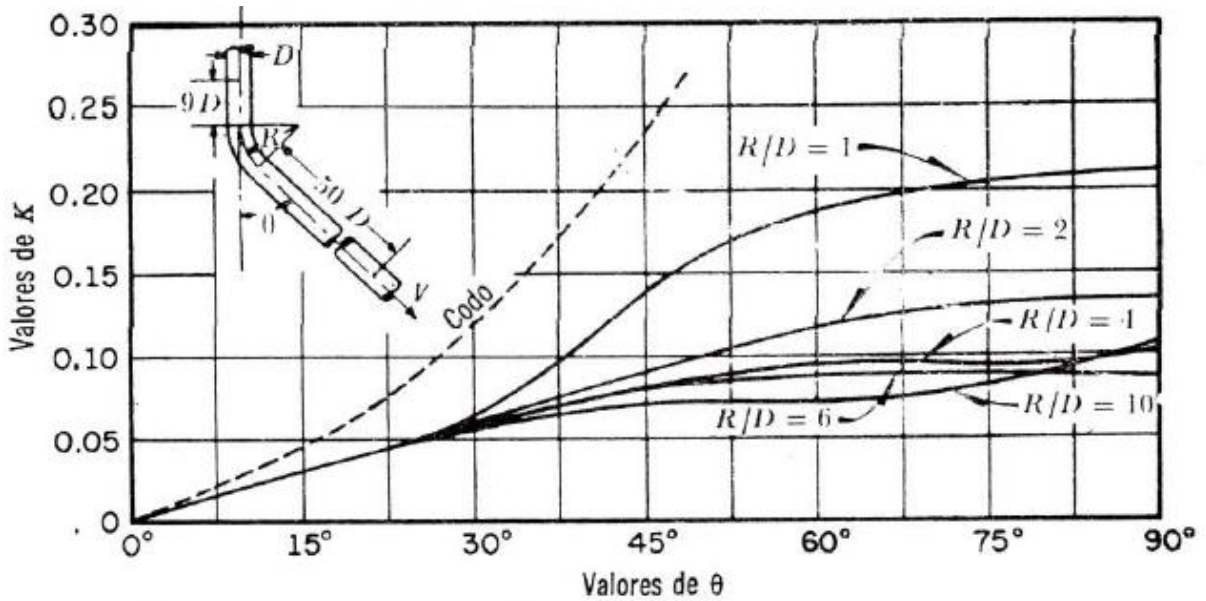


Figura 3.10 Coeficientes de pérdida en curvas de diámetro constante con superficie lisa y $Re = 2.25 \times 10^5$, [Sotelo, 1991].

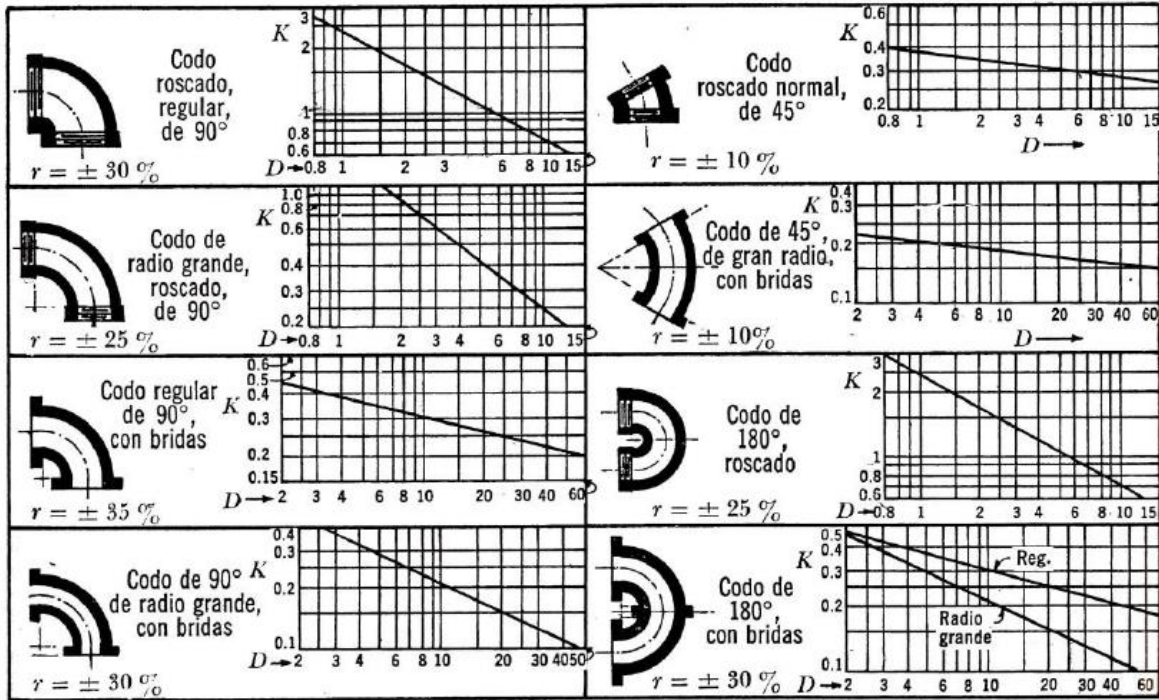


Figura 3.11 Coeficientes de pérdida de codos, [Sotelo, 1991].

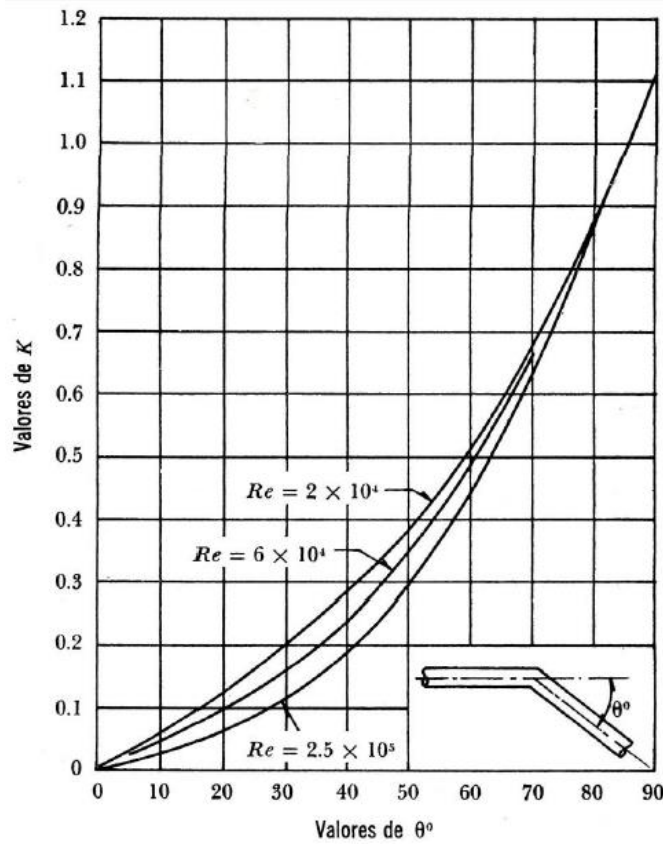
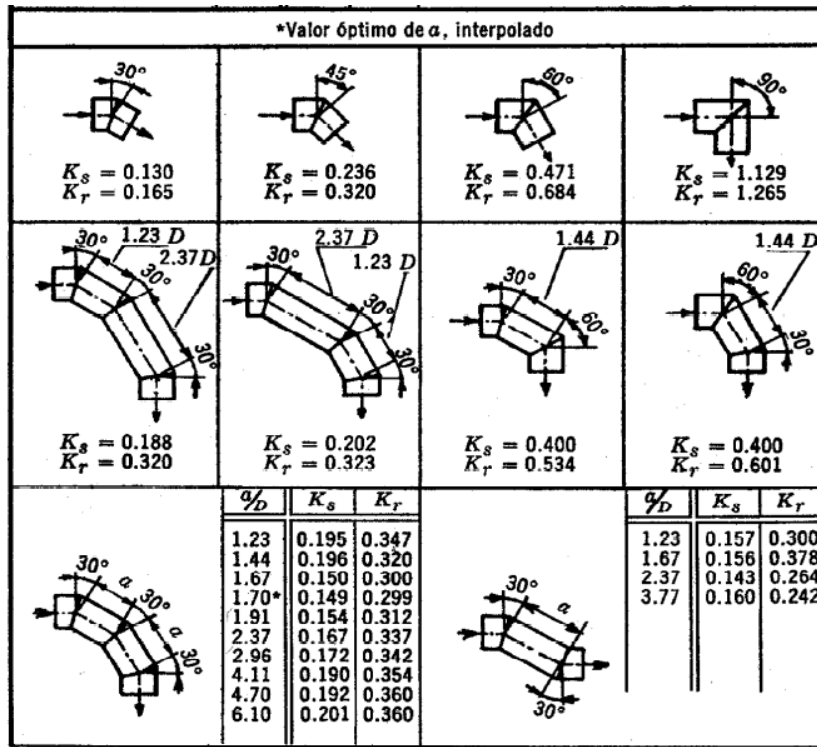


Figura 3.12 Coeficientes de pérdida K para codo, [Sotelo, 1991].



K_s = Coeficiente de pérdida para una superficie lisa.
 K_r = Coeficiente de pérdida para una superficie rugosa, $\frac{l\epsilon}{D} = 0.0022$.

Figura 3.13 Coeficiente de pérdida local "K" para codos con número de Reynolds de 2.225×10^5 [Sotelo, 1991].

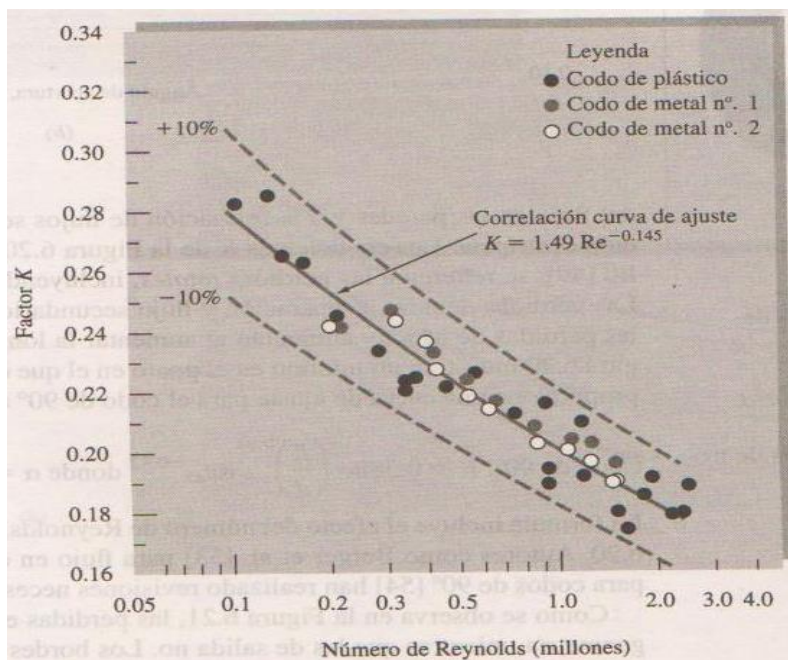


Figura 3.14 Coeficientes de pérdida en codos de 90°, [White, 2008].

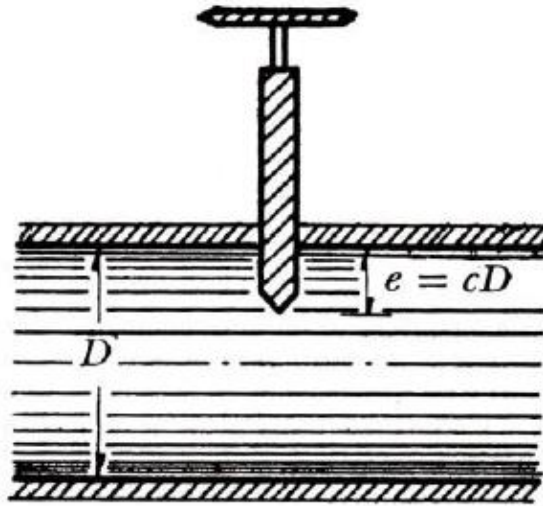


Figura 3.15 Válvula de compuerta, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.6 Coeficientes de pérdida para válvulas de compuerta de diámetro $D= 50$ mm, [Sotelo, 1991].

C	K	A/A₀
1/8	0.07	0.040
2/8	0.26	0.856
3/8	0.81	0.74
4/8	2.06	0.609
5/8	5.52	0.466
6/8	17	0.315
7/8	97.8	0.159
31/32	159	–

Tabla 3.7 Coeficientes de pérdida para válvulas de compuerta, [Sotelo, 1991].

D mm	25	100	159	300	900	
Valores de c	0.95	–	–	850	680	–
	0.9	–	–	215	165	–
	0.8	–	–	47	35	28
	0.75	32	16	–	–	–
	0.7	–	–	16	12	9
	0.6	–	–	7	5.5	4

	0.5	4.1	2.6	3.3	2.7	1.8
	0.4	–	–	1.7	1.3	–
	0.3	–	–	1.05	0.65	–
	0.25	0.23	0.14	–	–	–
	0.2	–	–	0.68	0.29	–
	0	0.23	0.14	–	–	–

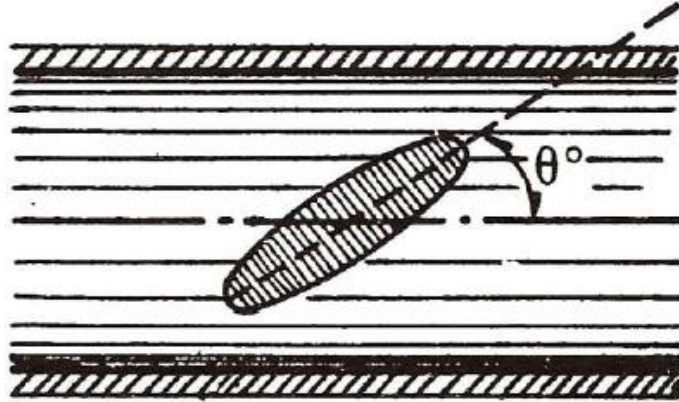


Figura 3.16 Válvula de lenteja o mariposa, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.8 Coeficientes de pérdida para válvulas de lenteja, [Sotelo, 1991].

θ°	K	A/A_0
5	0.24	0.913
10	0.52	0.826
15	0.90	0.741
20	1.54	0.658
25	2.51	0.577
30	3.91	0.500
35	6.22	0.426
40	10.8	0.357
45	18.7	0.293
50	32.6	0.234
55	58.8	0.181
60	118	0.124
65	256	0.094
70	751	0.06
90	∞	0

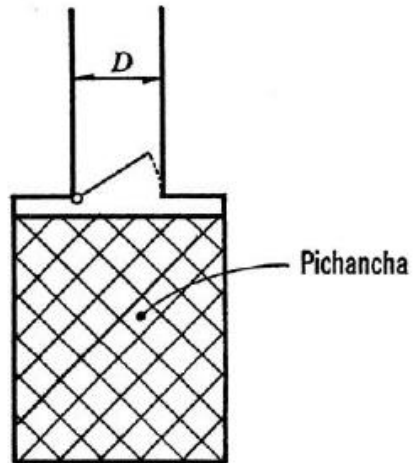


Figura 3.17 Válvula de pie con pichancha abierta, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.9 Coeficientes de pérdida para válvulas de pie abierta con pichancha, [Sotelo, 1991].

$D,$ <i>En m</i>	K	$D,$ <i>En m</i>	K
0.040	12.9	0.20	5.2
0.050	10.0	0.25	4.4
0.065	8.8	0.30	3.7
0.080	8.0	0.35	3.4
0.100	7.0	0.40	3.1
0.125	6.5	0.45	2.8
0.150	6.0	0.50	2.5

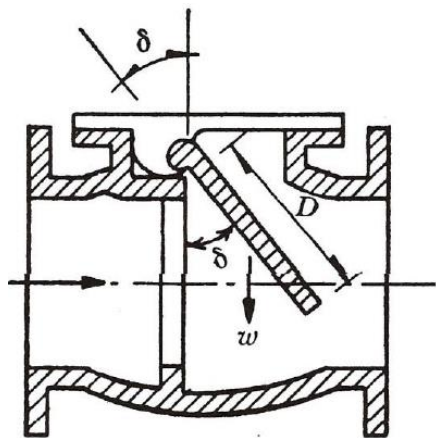


Figura 3.18 Válvula check o de retención, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.10 Coeficientes de pérdida para válvulas de retención completamente abiertas, [Sotelo, 1991].

<i>D en m</i>	<i>K</i>
0.05	18
0.075	11
0.10	8
0.15	6.5
0.2	5.5
0.25	4.5
0.3	3.5
0.35	3
0.4	2.5
0.5	0.8

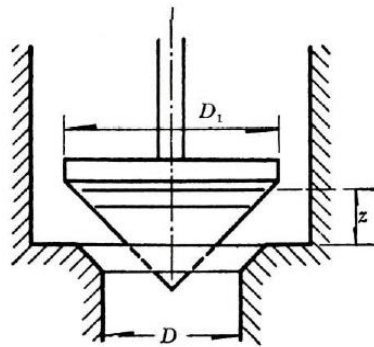


Figura 3.19 Válvula de alivio de forma cónica, [Sotelo, 1991].

Para válvulas de alivio cuando es cónica resulta conveniente emplear la fórmula siguiente:

$$K = 2.6 - 0.8 \frac{D}{z} + 0.14 \left(\frac{D}{z} \right)^2 \quad (3.9)$$

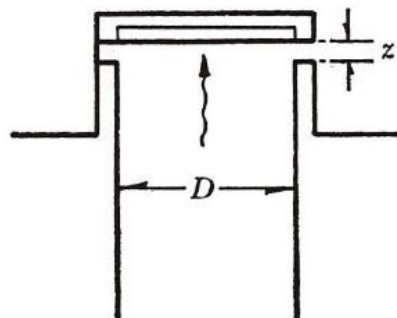


Figura 3.20 Válvula de alivio plana, [Sotelo, 1991].

Para válvulas de alivio cuando es plana se emplea la fórmula siguiente:

$$K = 0.6 + 0.15 \left(\frac{D}{z} \right)^2 \quad (3.10)$$

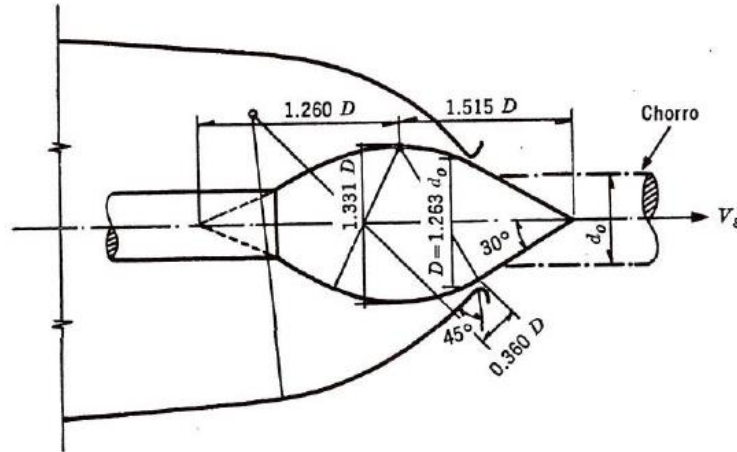


Figura 3.21 Válvula de aguja, según Escher, [Sotelo, 1991].

Para una válvula de este tipo totalmente abiertas el coeficiente máximo de velocidad es $C_v \approx 0.96$ a 0.98 . De esta manera el coeficiente de pérdida de energía quedará expresado por la ecuación siguiente:

$$K = \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (3.11)$$

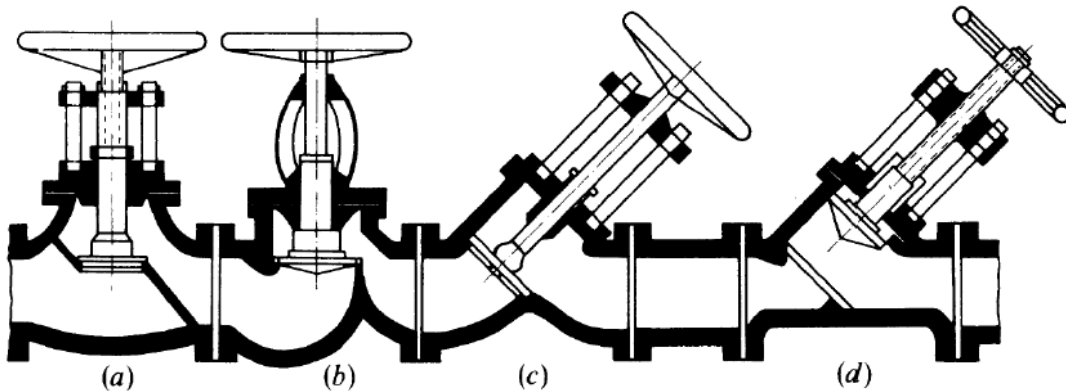



Figura 3.22 Válvulas diversas, [Mataix, 1998].

Tabla 3.11 Coeficientes de pérdida K, [Mataix, 1998].

Esquema	a	B	C	d
	2.9	2.0-2.7	1.4 a 2.5	0.44 a 0.8

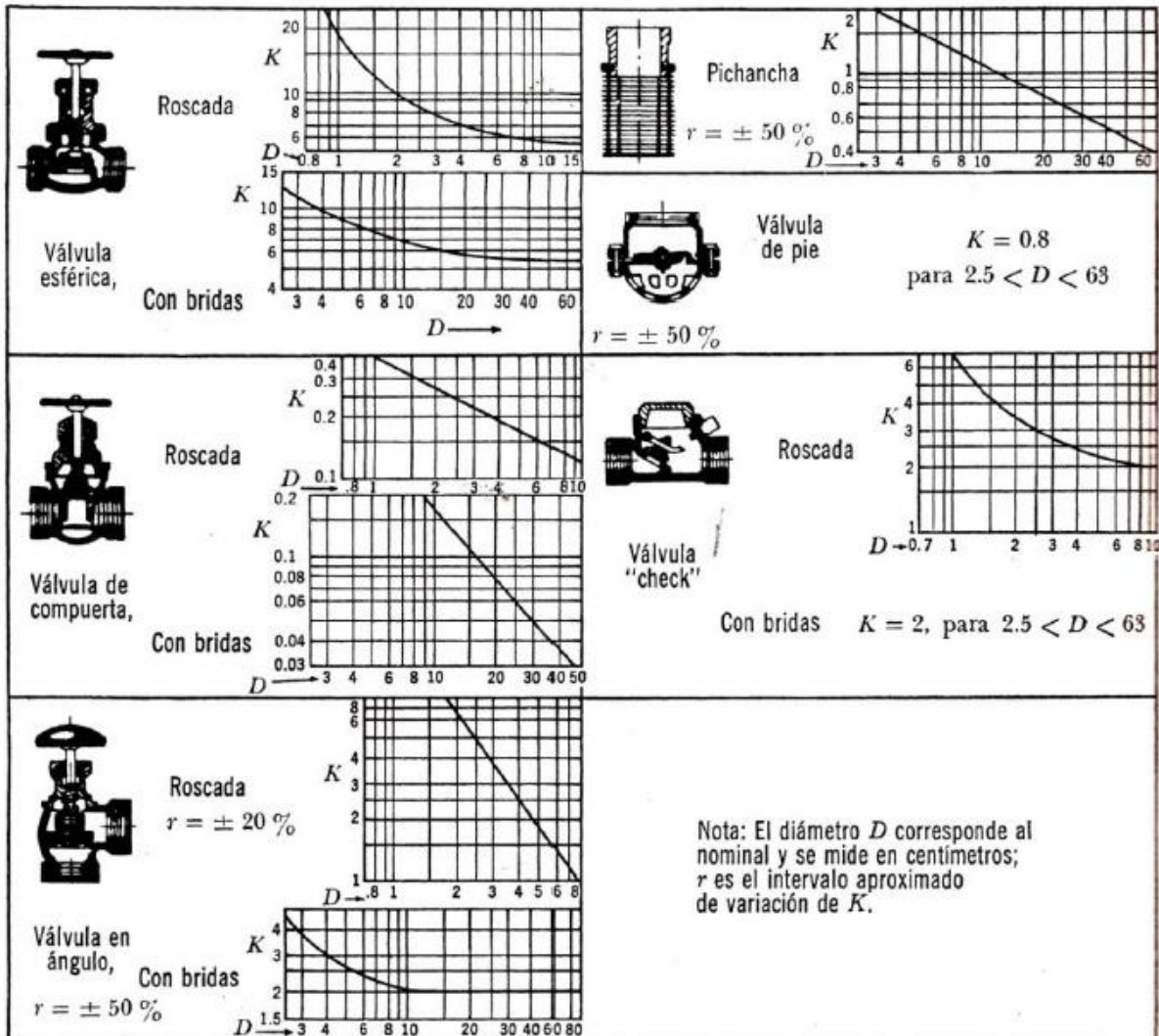


Figura 3.23 Coeficientes de pérdida para válvulas completamente abiertas, [Sotelo, 1991].

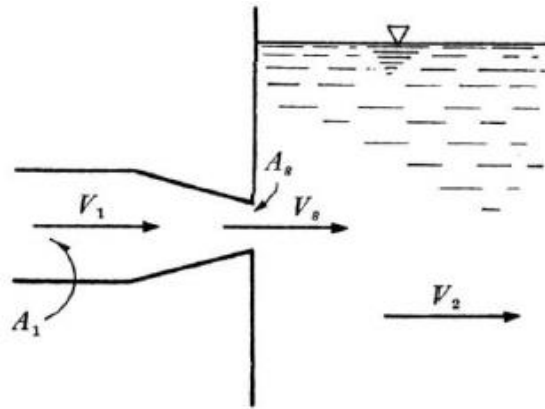


Figura 3.24 Esquema de pérdida de salida, [Sotelo, 1991].

Tabla 3.12 Coeficientes de pérdida por salida, [Sotelo, 1991].

$\frac{A_s}{A_1}$	K
0.1	0.83
0.2	0.84
0.3	0.85
0.4	0.87
0.5	0.88
0.6	0.90
0.7	0.92
0.8	0.94
0.9	0.965
1	1.0

Tabla 3.13 Coeficientes de pérdida para bifurcaciones en tuberías (cantos agudos), [Sotelo, 1991].

$\frac{Q_a}{Q}$	Separación				Unión			
	$\theta = 90^\circ$		$\theta = 45^\circ$		$\theta = 90^\circ$		$\theta = 45^\circ$	
	K_a	K_c	K_a	K_c	K_a	K_c	K_a	K_c
0.0	0.95	0.04	0.90	0.04	-1.20	0.04	-0.92	0.04
0.2	0.88	-0.08	0.68	-0.06	-0.40	0.17	-0.38	0.17
0.4	0.89	-0.05	0.50	-0.04	0.08	0.30	0.00	0.19
0.6	0.95	0.07	0.38	0.07	0.47	0.40	0.22	0.09
0.8	1.10	0.21	0.35	0.20	0.72	0.51	0.37	-0.17
1.0	1.28	0.35	0.48	0.33	0.91	0.60	0.37	-0.54

Tabla 3.14 Coeficientes de pérdida para bifurcaciones en tuberías (cantos redondeados), [Sotelo, 1991].

Q_a/Q	θ	D_a/D	V_a/v	K_a
0.3	90°	1	0.3	0.76
	60°	0.61	0.8	0.59
	45°	0.58	0.9	0.35
0.5	90°	1	0.5	0.74
	60°	0.79	0.8	0.54
	45°	0.75	0.9	0.32
0.7	90°	1	0.7	0.88
	60°	1	0.7	0.52
	45°	1	0.7	0.30

Tabla 3.15 Bifurcaciones a 45° (Gasto divergente).

Q diverg / Q total	Coeficientes k	
	<i>Tub. Divergente</i>	<i>Tub. Principal</i>
0.00	0.90	0.40
0.20	0.66	-0.06
0.40	0.47	-0.04
0.60	0.33	0.07
0.80	0.29	0.20
1.00	0.35	0.33

Tabla 3.16 Bifurcaciones a 90° (Gasto divergente).

Q diverg / Q total	Coeficientes k	
	<i>Tub. Divergente</i>	<i>Tub. Principal</i>
0.00	0.96	0.05
0.20	0.88	-0.08
0.40	0.89	-0.04
0.60	0.96	0.07
0.80	1.10	0.21
1.00	1.29	0.35

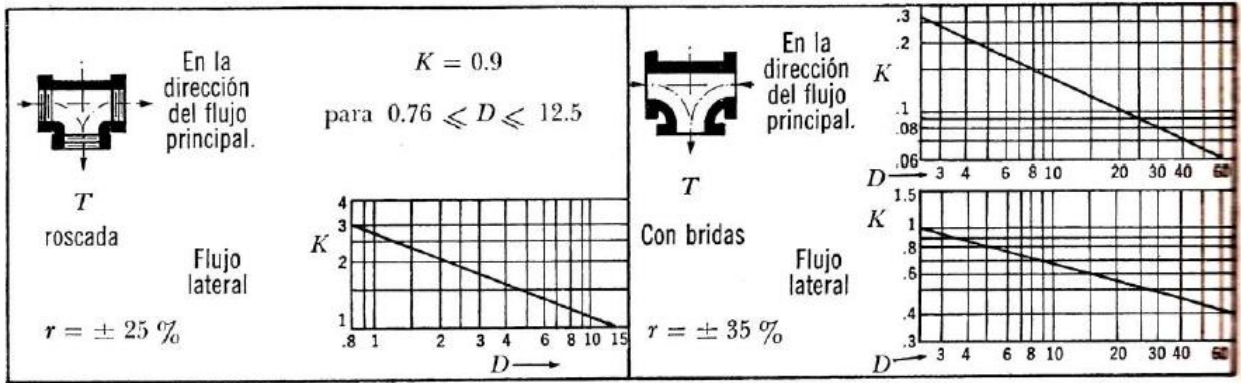


Figura 3.25 Coeficiente de pérdida en bifurcaciones de diámetro pequeño, [Sotelo, 1991].

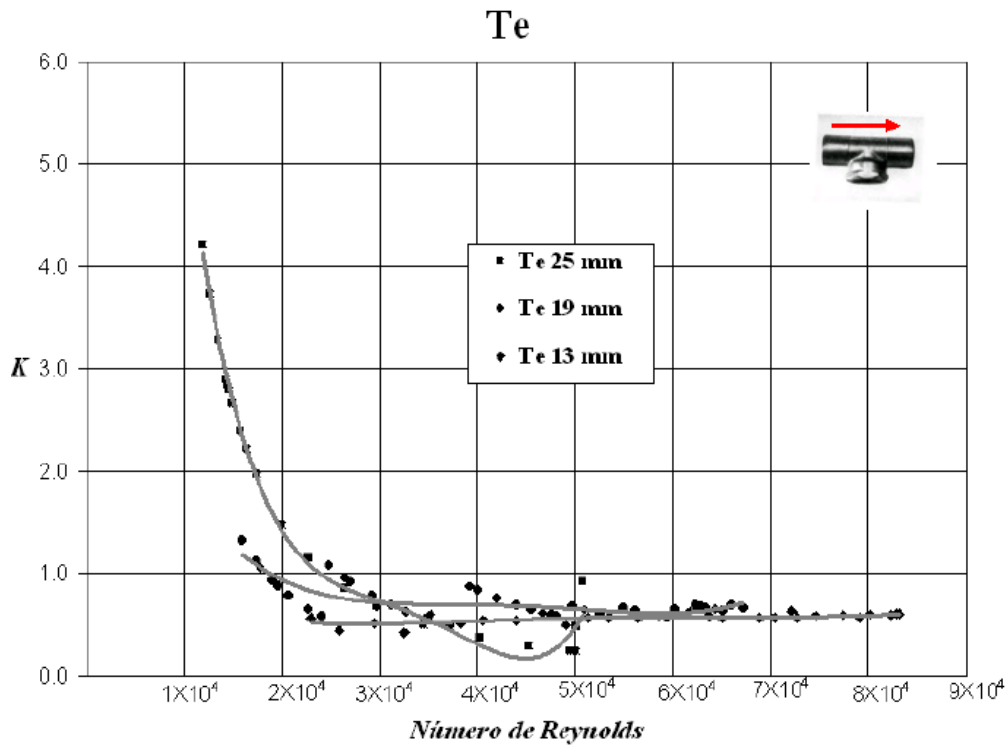


Figura 3.26 Coeficientes de pérdidas locales "K" en bifurcaciones a 90° para tuberías de cobre diámetros de 13, 19 y 25mm. (Fuentes y Rosales, 2004)

4. Las pérdidas locales en redes de tuberías de agua potable.

En este capítulo se hace una breve explicación de lo que son las redes de tuberías de agua potable, mencionando los tipos de redes y los elementos más comunes que las componen. Así mismo se presentaran las ecuaciones fundamentales que describen el funcionamiento de una red de abastecimiento de agua potable, bajo la premisa de que el flujo es permanente. También se plantea el cálculo de una red de agua potable. Posteriormente se ejemplifica cómo se comportan las pérdidas locales que se originan a lo largo de una toma domiciliaria.

Las redes de tuberías de agua potable son el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de almacenamiento hasta las tomas domiciliarias. Los conductos o tuberías se ramifican en diversos tipos de uniones o conexiones por medio de elementos especiales tales como los codos, tes, cruces y etc. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial e industrial. Es importante señalar que las tuberías debieron ser seleccionadas adecuadamente para suministrar los gastos demandados.

4.1 Principales componentes de una red de agua potable.

Una red de distribución de agua potable se compone generalmente de:

- a) Tuberías: Se le llama así al conjunto formado por tubos (conductos de sección circular). La red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nudos o uniones.

De acuerdo con su función, la red de distribución puede dividirse en: red primaria y red secundaria. A la tubería que conduce el agua desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación, y se considera parte de la red primaria.

La división de la red de distribución en red primaria o secundaria dependerá del tamaño de la red y de los diámetros de las tuberías. De esta forma, la red primaria se constituye de tubos de mayor diámetro y la red secundaria por las tuberías de menor diámetro, las cuales abarcan la mayoría de las calles de la localidad.

b) Piezas especiales: Son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros.

c) Válvulas: Son accesorios que se utilizan para disminuir o evitar el flujo en las tuberías. Pueden ser clasificadas de acuerdo a su función en dos categorías:

1) *Aislamiento o seccionamiento*, las cuales son utilizadas para separar o cortar el flujo del resto del sistema de abastecimiento en ciertos tramos de tuberías, bombas y dispositivos de control con el fin de revisarlos o repararlos.

2) *Control*, usadas para regular el gasto o la presión, facilitar la entrada de aire o la salida de sedimentos o aire atrapados en el sistema.

d) Hidrantes: Se le llama de esta manera a una toma o conexión especial instalada en ciertos puntos de la red con el propósito de abastecer de agua a varias familias o conectar una manguera o una bomba destinados a proveer agua para combatir el fuego (hidrante contra incendio).

e) Tanques de distribución: Un tanque de distribución es un depósito situado generalmente entre la captación y la red de distribución que tiene por objeto almacenar el agua proveniente de la fuente.

f) Tomas domiciliarias: Una toma domiciliaria es el conjunto de piezas y tubos que permite el abastecimiento desde una tubería de la red de distribución hasta el predio del usuario, así como la instalación de un medidor.

g) Rebombes: Consisten en instalaciones de bombeo que se ubican generalmente en puntos intermedios de una línea de conducción y excepcionalmente dentro de la red de distribución. Tienen el objetivo de elevar la carga hidráulica en el punto de su ubicación para mantener la circulación del agua en las tuberías.

h) Cajas rompedoras de presión: Son depósitos con superficie libre del agua y volumen relativamente pequeño, cuya función es permitir que el flujo de la tubería

se descargue en ésta, eliminando de esta forma la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo, [Franco, 2006].

4.2 Clasificaciones de una red de agua potable.

- a) Tipos de redes de abastecimiento según su uso: Dependiendo del uso al que vaya destinada el agua, las redes pueden ser: redes generales de suministro de agua en zonas urbanas, redes de abastecimiento para zonas residenciales, redes exclusivas de riego y etc.
- b) Tipos de redes de abastecimiento según su topología: Es decir en la forma en la que están conectadas entre sí, se distinguen las siguientes: abiertas, cerradas y mixtas.
- c) Tipos de redes de abastecimiento según el sistema de alimentación: depósitos a presión atmosférica, elevados o semienterrados, inyección directa a red mediante equipos de bombeo y entre otros, [Jiménez, 2004].

4.3 Consideraciones del funcionamiento de una red de agua potable.

En un flujo permanente o flujo estacionario, las condiciones de velocidad en cualquier punto no cambian con el tiempo o son cambios muy pequeños, tampoco existen cambios en la densidad, presión o temperatura con el tiempo.

A continuación se enlistan tres hipótesis para poder describir de manera teórica el funcionamiento de una red a presión:

- 1) Flujo unidimensional en el sentido del eje de cada conducción de la red.
- 2) Distribución uniforme de velocidades y presiones en cualquier sección transversal de las tuberías.
- 3) Fluido incompresible, newtoniano y de características homogéneas.

Para poder llevar a cabo el análisis hidráulica de la red de agua potable se emplean métodos basados en las leyes de conservación de la masa (Ley de continuidad), cantidad de movimiento y energía.

4.3.1 Conservación de la masa (Ecuación de continuidad).

La conservación de la masa postula que la masa no se crea ni se destruye. Este concepto origina la ecuación de la continuidad, la cual en palabras claras dice que en cualquier sistema hidráulico se debe balancear la descarga que entra, el volumen que se almacena y la descarga que sale.

Como:

$$Q = VA$$

Resulta que:

$$V_a A_a = V_b A_b = C$$

Es decir, la masa que entra en un volumen de control debe ser igual a la que sale.

$$Q_{entra} - Q_{sale} = 0 \quad (4.1)$$

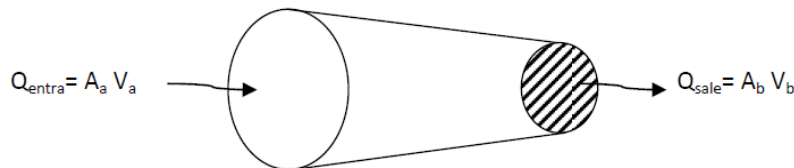


Figura 4.1 Esquema de entrada y salida del volumen de control, [Hurtado, 2013].

4.3.2 Conservación de la energía.

La ley de la conservación de la energía establece que la energía no se puede perder, se convierte en otras. Este principio se puede reformular en ecuaciones, un ejemplo de ello es en la ecuación de Bernoulli.

El principio de Bernoulli, describe cómo se comporta un flujo laminar moviéndose a lo largo de una corriente de agua, bajo la premisa de “flujo ideal”, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. Esta energía consta de tres tipos de energía:

- 1) La energía cinética: Producida por la velocidad que posee el fluido.

- 2) La energía potencial: Esta se da debido a la altitud en la que se encuentra el fluido.
- 3) La energía de flujo: Originada por la presión que el fluido tiene.

$$E_T = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (4.2)$$

Dónde:

z cota geométrica con respecto al nivel de referencia.

$\frac{P}{\gamma}$ carga de presión del fluido (presión manométrica), donde γ es el peso específico del fluido.

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ carga de velocidad del fluido, donde V es la velocidad media, g es la

aceleración de gravedad y α es el coeficiente de Coriolis.

La energía total de un fluido debería permanecer constante a lo largo de su trayecto, pero esto no es posible debido a que hay factores que provocan “pérdidas” como el rozamiento entre el fluido y las paredes internas de una tubería, accesorios o piezas especiales. Estas pérdidas de energía se transforman en calor, como se había mencionado anteriormente. En la figura 4.2 se representa este comportamiento.

$$Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{\alpha V_a^2}{2g} = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{\alpha V_b^2}{2g} + h_{ab} \quad (4.3)$$

Dónde:

h_{1-2} son las pérdidas de energía entre las secciones, tanto por fricción o por piezas especiales.

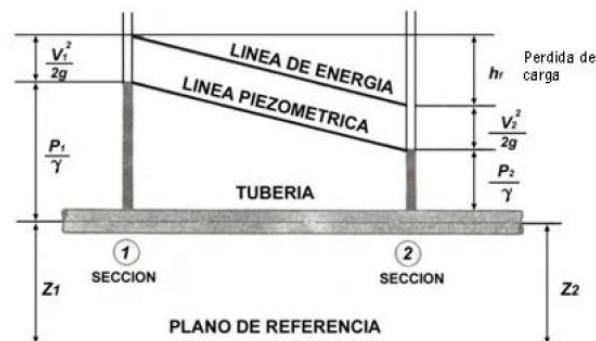


Figura 4.2 Esquema del comportamiento de la energía en una tubería, [Fuente: apuntesingenierocivil].

4.3.3 Conservación de la cantidad de movimiento.

De acuerdo a la segunda ley del movimiento de Newton (ecuación 4.4), se puede escribir el cambio de la cantidad de movimiento de un volumen dado de un fluido como:

$$F = ma \quad (4.4)$$

$$M_{salida} = F + M_{entrada} \quad (4.5)$$

$$\rho QV_b = F + \rho QV_a \quad (4.6)$$

La ecuación 4.5 y 4.6 representan la cantidad de movimiento en un sistema hidráulico, la cual no se puede perder aunque parte de la misma pueda llegar a ser fuerzas de impulso. Considerando la ecuación 4.4, en una sección con entrada y salida se obtiene lo siguiente (considerando que la masa es constante):

$$\sum F_x = mv_2 - mv_1 = m(v_2 - v_1) \quad [Kg \cdot m/s^2] \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 se puede escribir de la siguiente manera:

$$\sum F_x = m dv \quad (4.8)$$

Considerando que:

$$m = \rho Av \quad (4.9)$$

Obtenemos lo siguiente:

$$\sum F_x = (\rho Av) dv \quad (4.10)$$

Si el eje x coincide con la dirección del flujo, podemos obtener la siguiente ecuación llamada de "fuerzas externas":

$$\sum F_x = -dW \sin \theta - (dA + A)p_1 + p_2 \quad (4.11)$$

4.4 Planteamiento del cálculo de una red de agua potable.

Proponiendo una red como la que se muestra en la figura 4.3, con longitudes (L_1, L_2, L_3, L_4 y L_5), diámetros (d_1, d_2, d_3, d_4 y d_5) y coeficientes de fricción (f_1, f_2, f_3, f_4 y f_5) de tuberías conocidas, así como gastos de demanda definidos (q_1, q_2, q_3 y q_4).

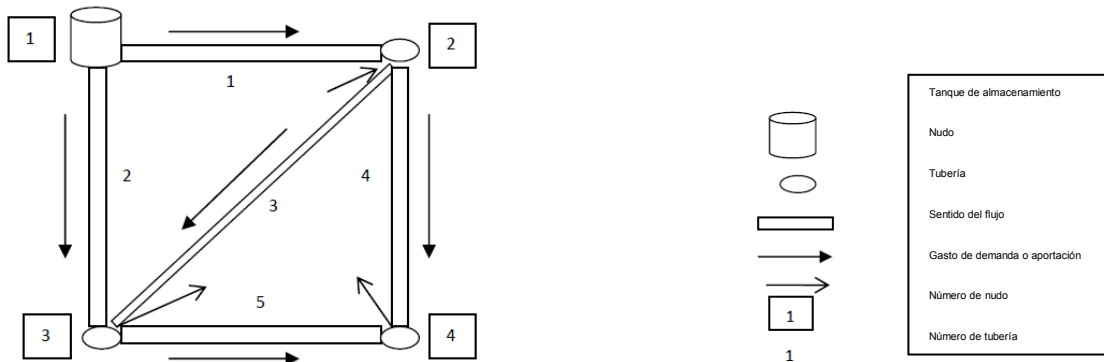


Figura 4.3 Esquema de Red, con 4 nudos, [Hurtado, 2013].

Del principio de continuidad, obtenemos las ecuaciones para cada nudo:

$$-Q_1 - Q_2 = q_1 \quad \text{Nudo 1} \quad (4.12)$$

$$Q_1 - Q_3 - Q_4 = -q_2 \quad \text{Nudo 2} \quad (4.13)$$

$$Q_2 + Q_3 - Q_5 = q_3 \quad \text{Nudo 3} \quad (4.14)$$

$$Q_5 + Q_4 = q_4 \quad \text{Nudo 4} \quad (4.15)$$

De la ecuación de pérdida de carga por fricción de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A}; \quad V^2 = \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

$$hf = f \frac{L}{d} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (4.16)$$

En el sistema internacional de unidades se tiene que:

$$A^2 = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^2$$

$$hf = f \frac{L}{d} \frac{Q^2}{2g \left(\frac{\pi^2 D^4}{16} \right)}$$

$$h_f = 0.0826 \frac{fL}{d^5} Q^2 \quad (4.17)$$

$$C = 0.0826 \left(\frac{fL}{d^5} \right) \quad (4.18)$$

Dónde:

f es el factor de fricción

L es la longitud (m)

d es el diámetro de la tubería (m)

Ahora bien, si se consideran las pérdidas locales se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta C = \frac{0.08263 K}{D^4} \quad (4.19)$$

Dónde:

K es el coeficiente de pérdida local (adimensional)

D es el diámetro de la tubería (m)

Este incremento se suma a la C obtenida para las pérdidas por fricción.

$$h_f = CQ^2 \quad (4.20)$$

Considerando lo siguiente:

$$h_f = h_s - h_i \quad (4.21)$$

$$h_s - h_i = CQ^2 \quad (4.22)$$

Despejando el gasto Q:

$$K = \sqrt{\frac{1}{C}} \quad (4.23)$$

$$Q = K (h_s - h_i)^{1/2} \quad (4.24)$$

Para muchas aplicaciones de redes de tuberías interesa calcular los gastos que fluyen en cada una de sus conductos y las cargas piezométricas en los extremos de estos (nudos).

Sustituyendo las ecuaciones a fin de dejarla en función de las cargas de energía:

Nudo 1:

$$-K_1(h_{s1} - h_{i1})^{1/2} - K_2(h_{s2} - h_{i2})^{1/2} = q_1 \quad (4.25)$$

Nudo 2:

$$K_1(h_{s1} - h_{i1})^{1/2} - K_3(h_{s3} - h_{i3})^{1/2} - K_4(h_{s4} - h_{i4})^{1/2} = -q_2 \quad (4.26)$$

Nudo 3:

$$K_2(h_{s2} - h_{i2})^{1/2} + K_3(h_{s3} - h_{i3})^{1/2} - K_5(h_{s5} - h_{i5})^{1/2} = q_3 \quad (4.27)$$

Nudo 4:

$$K_4(h_{s4} - h_{i4})^{1/2} + K_5(h_{s5} - h_{i5})^{1/2} = q_4 \quad (4.28)$$

Dónde:

h_{sn} carga en nodo inicial, C/r tubo n

h_{in} carga en nodo final, C/r tubo n

q_n gasto de entrada o salida en nodo n

K_n coeficiente en función de

L_n longitud del tubo n

d_n diámetro del tubo n

f_n factor de fricción del tubo n

Y se pueden escribir como:

Nodo 1:

$$-K_1(h_1 - h_2)^{1/2} - K_2(h_1 - h_3)^{1/2} = q_1 \quad (4.29)$$

Nodo 2:

$$K_1(h_1 - h_2)^{1/2} - K_3(h_2 - h_3)^{1/2} - K_4(h_2 - h_4)^{1/2} = -q_2 \quad (4.30)$$

Nodo 3:

$$K_2(h_1 - h_3)^{1/2} + K_3(h_2 - h_3)^{1/2} - K_5(h_3 - h_4)^{1/2} = q_3 \quad (4.31)$$

Nodo 4:

$$K_4(h_2 - h_4)^{1/2} + K_5(h_3 - h_4)^{1/2} = q_4 \quad (4.32)$$

Dónde:

h_n carga en nodo, c/r tubo n

El sistema de ecuaciones no lineales que se genera es complejo, por lo que para resolverlo se puede emplear el método de Newton-Raphson. Otra manera de solucionar este sistema es el método de Hardy-Cross [1939] el cual considera circuitos dentro de la red, así que disminuye el número de ecuaciones no lineales por solucionar. Aunque en la actualidad se utilizan procedimientos numéricos que se aplican con computadora, por ejemplo el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM [Sánchez y Fuentes, 1991] al cual se le dedicará un capítulo.

4.4.1 Pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable.

Como ya se había mencionado aunque el apelativo de “pérdidas menores” puede llevar a pensar que no son de gran importancia estas cobran importancia cuando son redes de agua potable de longitudes cortas y con gran densidad de accesorios. Un ejemplo de ello y muy importante es el de las tomas domiciliarias.

A continuación se incorpora el cálculo de las pérdidas locales en una toma domiciliaria de agua potable.

4.4.1 Pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable.

Una toma domiciliaria es la instalación que se deriva de la tubería de la red de distribución de agua y termina dentro del predio del usuario, constituida por dos elementos básicos: el ramal y el cuadro. [CONAGUA, 2007].

La función del ramal es conducir el agua de la tubería de la red a la instalación hidráulica del domicilio. Mientras que en el cuadro se encuentran la instalación del medidor, la válvula de globo y la llave de manguera. Las dimensiones promedio del cuadro son 0.60m

de altura a partir del piso y 0.50m de largo aproximadamente, el material del que está hecho puede ser de cobre, de fierro galvanizado o una combinación de los dos, [Fuentes y Rosales, 2004].

En la figura 4.4 se pueden observar los elementos que componen una toma domiciliaria.

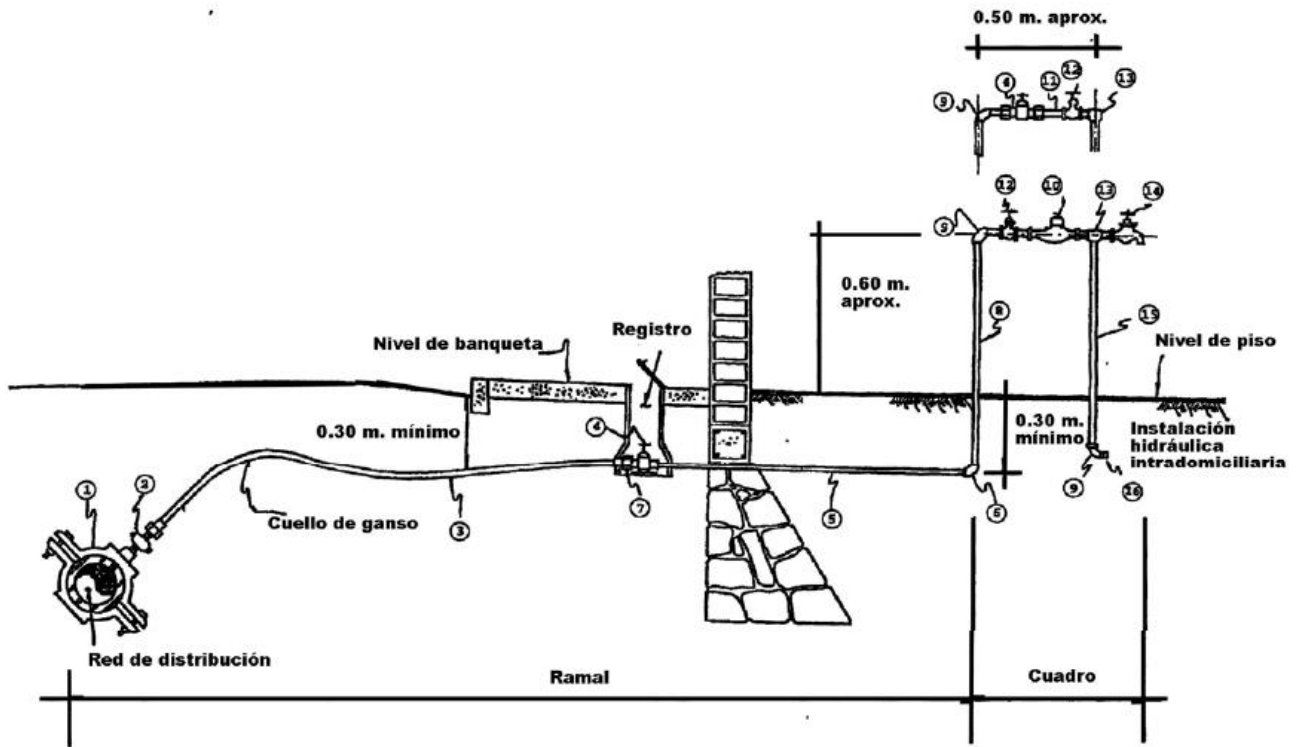


Figura 4.4 Toma domiciliaria, [CONAGUA, 2007].

Tabla 4.1 Elementos de una toma para agua potable, [CONAGUA, 2007].

No	ELEMENTO	MATERIAL	ESPECIFICACIÓN	NORMA
RAMAL				
1	ABRAZADERA	BRONCE Fo.Go. PVC PEAD	ABRAZADERA PARA TUBO DE A-C ABRAZADERA PARA TUBO DE A-C ABRAZADERA PARA TUBO DE PVC SILLETA PARA TUBO DE PEAD	ASTM-B-30 NIVIX-13-008 NMX-E-191 -----
2	INSERTOR	BRONCE BRONCE PVC PVC	VÁLVULA DE INSERCIÓN CON CUERDA TIPO AWWA VÁLVULA DE INSERCIÓN FLARE O COMPRESIÓN CON EMPAQUE DE BUNA "N" ADAPTADOR DE INSERCIÓN CON CUERDA NPT VÁLVULA DE INSERCIÓN CON CUERDA TIPO NPT	ASTM-B-30 ÁSTM-B-30 NMX-E-192 NMX-E-207
3	TUBO FLEXIBLE	COBRE PEAD	FLEXIBLE (TIPO "L")	NMX-W-18 NMX-E-146
4	VÁLVULA DE BANQUETA	BRONCE PVC	PARA COBRE DE PEAD A Fo.Go. PARA PEAD	ASTM-B-30 ASTM-B-30 NMX-E-207
5	TUBO RÍGIDO	COBRE Fo.Go.	RÍGIDO (TIPO "M") CON CUERDA EXTERIOR	NMX-W-18 NMX-B-177
6	CODO INFERIOR DEL VERTICAL	BRONCE COBRE Fo.Go.	SOLDABLE SOLDABLE CON CUERDA INTERIOR	ASTM-B-30 NMX-W-101 NMX-B-177
7	CONECTORES	BRONCE PLÁSTICO	DE COMPRESIÓN DE COMPRESIÓN	NMX-E-192
CUADRO				
4	VÁLVULA DE BANQUETA	BRONCE PVC	PARA COBRE DE PEAD A Fo.Go. PARA PEAD	ASTM-B-30 ASTM-B-30 NMX-E-207
8,11 Y 15	TUBO RÍGIDO DEL CUADRO,	COBRE Fo.Go.	RÍGIDO (TIPO "M") CON CUERDA EXTERIOR	NMX-W-18 NMX-B-177
9	CODOS	COBRE Fo.Go.	SOLDABLE CUERDA INTERIOR	NMX-W-101 NMX-B-214
10	MEDIDOR			NOM-012-SCFI
12	VÁLVULA DE GLOBO	BRONCE	SOLDABLE CON CUERDA INTERIOR	ASTM-B-30 ASTM-B-30
13	TEE	COBRE Fo.Go.	COBRE A COBRE A CUERDA INTERIOR CON CUERDA INTERIOR	NMX-W-101 NMX-B-214
14	LLAVE DE MANGUERA	BRONCE	CON CUERDA EXTERIOR	ASTM-B-30
16	TAPÓN	COBRE Fo.Go.	HEMBRA CUERDA EXTERIOR	NMX-W-101 NMX-B-214

ASTM: American Society for Testing and Materials
 NMX: Norma Mexicana
 NOM: Norma Oficial Mexicana

En el artículo llamado "Estimación de pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable" [México, Enero-Marzo 2004] del Dr. Óscar Fuentes Mariles y de la M. en I. Ismene Libertad Rosales Plascencia, se incluyen estimaciones de las pérdidas locales para los principales accesorios empleados en las tomas domiciliarias obtenidas experimentalmente. Entre estos accesorios se encuentran el codo de 90°, la "T" con llave de manguera, el medidor y la válvula de globo (completa y parcialmente abierta). Los diámetros que se utilizaron fueron de 13, 19 y 25mm, y el material cobre. [Fuentes y Rosales, 2004].

Los resultados obtenidos en dicho trabajo se plasman a continuación en una serie de tablas y gráficas.

Tabla 4.2 Números de Reynolds contra coeficientes K para codos de 13,19 y 25mm, [Fuentes y Rosales, 2004].

Diámetro 13 mm		Diámetro 19mm		Diámetro 25mm	
K	Re	K	Re	K	Re
0.46	2.2	0.78	2.06	0.73	1.85
0.45	2.45	0.69	2.22	0.58	2.2
0.48	2.7	0.66	2.265	0.57	2.27
0.53	2.92	0.8	2.5	0.5	2.33
0.535	3.15	0.95	2.63	0.49	2.4
0.48	3.3	0.87	2.76	0.44	2.57
0.55	3.5	0.79	2.91	0.399	2.74
0.49	3.72	0.72	3.05	0.35	2.86
0.495	3.98	0.64	3.245	0.32	3
0.51	4.25	0.9	3.35	0.29	3.22
0.46	4.46	0.815	3.52	0.49	3.49
0.56	4.5	0.74	3.7	0.41	3.82
0.49	4.6	0.69	3.83	0.38	3.96
0.5	4.83	0.65	3.96	0.5	4.23
0.505	5.03	0.61	4.1	0.44	4.47
0.51	5.25	0.545	4.66	0.7	4.59
0.567	5.34	0.57	5.198	0.56	5.14
0.53	5.58	0.51	5.5		
0.499	5.75	0.45	5.856		
0.56	5.95	0.52	6.09		
0.53	6.11	0.58	6.25		
0.52	6.23	0.57	6.56		
0.485	6.54	0.54	6.71		
0.58	6.95	0.54	7.97		
0.53	7.05	0.54	8.05		
0.57	7.27				
0.55	7.42				
0.565	7.56				
0.53	7.7				
0.51	7.9				
0.545	8.13				
0.55	8.34				
0.55	8.415				
0.55	8.5				
0.55	8.56				

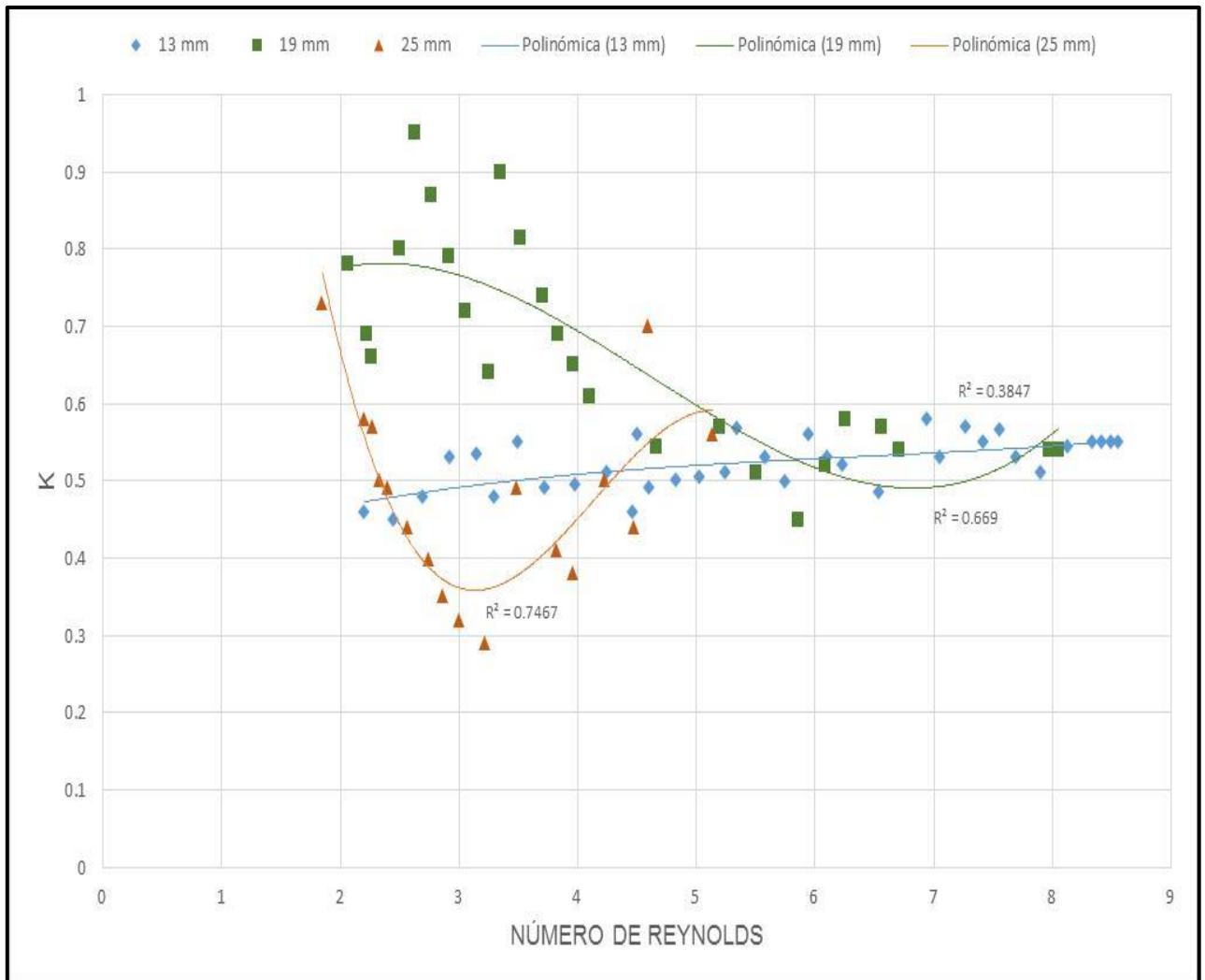


Figura 4.5 Coeficientes K para el codo de 90° de cobre.

Tabla 4.3 Números de Reynolds contra coeficientes K para válvula de globo de 19mm, [Fuentes y Rosales, 2004].

50% abierta		75% abierta		100% abierta	
K	Re	K	Re	K	Re
86	0.56	41	0.62	27.5	0.62
92	0.7	38	0.83	29.1	0.89
97	0.79	39.8	0.91	32.5	0.91
91	0.85	42	1.05	34.5	1.04
89	0.93	39.8	1.11	37.8	1.075
88	1.08	42	1.2	35.5	1.18
96.5	1.1	39	1.28	38	1.32
91	1.16	39.9	1.3	34.5	1.35
92.5	1.22	42	1.42	36.2	1.38
93	1.26	37	1.48	34.5	1.46
89	1.32	41	1.5	34.6	1.53
86.5	1.42	40.9	1.55	34.7	1.56
87	1.51	39	1.67	35.1	1.67
89.5	1.58	40	1.71	34.5	1.76
88	1.6	39.5	1.82	35.5	1.91
87	1.7	38	1.95	35	2.1
89.7	1.79	38	2.06	35	2.2
86	1.82	37	2.12	36.5	2.31
89	1.9	39	2.18	36	2.44
85.8	1.91	38	2.2	34	2.6
85.7	1.99	40	2.28	33.99	2.67
87	2.05	38	2.4	34.1	2.81
83	2.12	37.5	2.5	34.5	2.87
82	2.21	37	2.64	35.9	2.96
85	2.28	39	2.66	33.97	3.13
85.5	2.31	38.7	2.72	34.7	3.25
86	2.36	39	2.82	34.88	3.32
85.3	2.43	39.5	2.84	34.7	3.497
86	2.51	38.6	2.96	34.7	3.515
84.8	2.62	39.2	3.05	34.99	3.57
86	2.68	38.4	3.15	35.5	3.725
83.5	2.72	38	3.22	34.5	3.88
85.2	2.81	39	3.26	35.7	3.96
83	2.85	39	3.32	35	4.14
84.7	2.95	39	3.36	35	4.31
85	3.02	39	3.48	35.56	4.448
88	3.08	39	3.55	34.9	4.58
85.2	3.18	39	3.68	35.8	4.63
85.8	3.28	39.6	3.8	34.97	4.77
87	3.31	38.6	3.97	35.1	4.825
86	3.375	39.98	4.05	34.89	4.87
87.5	3.43	39	4.16	33.5	5.045
91	3.56	38	4.25		
91.5	3.65	38.6	4.32		
92.5	3.7	38.7	4.42		
91.5	3.72	38.5	4.52		
93	3.8	37	4.65		
91.5	3.88	37.8	4.73		
		38.85	4.85		
		38.2	4.95		

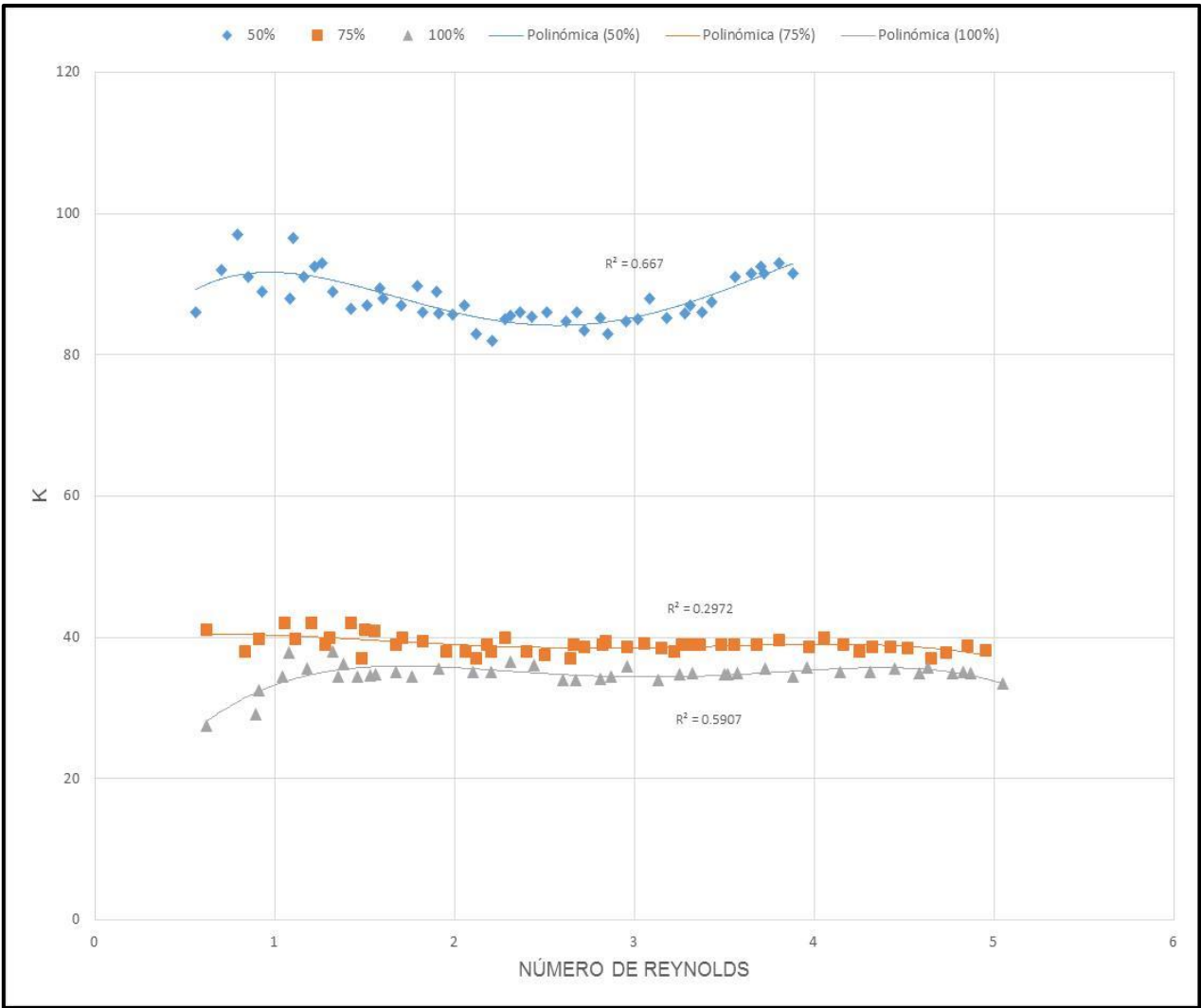


Figura 4.6 Coeficientes K para la válvula de globo de 19mm.

Tabla 4.4 Números de Reynolds contra coeficientes K para válvula de globo de 13mm, [Fuentes y Rosales, 2004].

50% abierta		75% abierta		100% abierta	
K	Re	K	Re	K	Re
54.01	1.04	28.95	1.20	20.31	1.04
56.17	1.04	28.52	1.33	19.88	1.33
57.47	1.12	28.52	1.35	19.01	1.41
56.17	1.20	28.95	1.41	19.44	1.49
57.04	1.31	29.38	1.61	19.88	1.57
57.04	1.41	29.38	1.73	20.74	1.69
54.44	1.49	29.81	1.90	19.88	1.88
57.04	1.57	28.95	2.00	20.31	2.14
55.31	1.67	29.38	2.12	19.88	2.35
52.72	1.73	29.38	2.20	19.88	2.55
54.44	1.82	29.81	2.37	19.88	2.63
53.58	1.94	29.81	2.51	19.88	2.78
51.85	2.00	28.95	2.59	19.88	2.98
51.42	2.16	28.52	2.71	19.88	3.12
49.26	3.22	29.81	2.78	19.88	3.20
50.56	2.29	29.38	2.88	19.88	3.37
49.26	2.45	29.38	2.97	19.88	3.49
47.53	2.51	29.38	3.06	19.44	3.65
48.40	2.63	29.81	3.16	19.01	3.82
46.23	2.73	28.95	3.27	20.31	3.86
46.23	2.82	28.95	3.39	19.88	3.98
44.94	3.00	28.52	3.45	19.44	4.18
44.94	3.04	29.38	3.53	19.88	4.31
45.37	3.20	29.81	3.67	19.88	4.43
44.07	3.33	29.81	3.73	19.44	4.59
44.07	3.41	29.38	3.82	19.01	4.67
43.64	3.49	29.81	3.90	20.31	4.71
42.35	3.61	29.38	4.00	19.88	4.82
44.07	3.69	29.81	4.02	19.88	5.00
43.21	3.73	28.09	4.16	19.88	5.12
43.21	3.82	29.38	4.18	19.44	5.16
43.64	3.86	28.95	4.24	19.88	5.27
42.35	3.94	29.38	4.41	19.88	5.33
43.64	4.06	29.38	4.45	19.44	5.37
42.78	4.09	29.38	4.49		
		29.38	4.59		
		29.38	4.63		
		29.56	4.67		

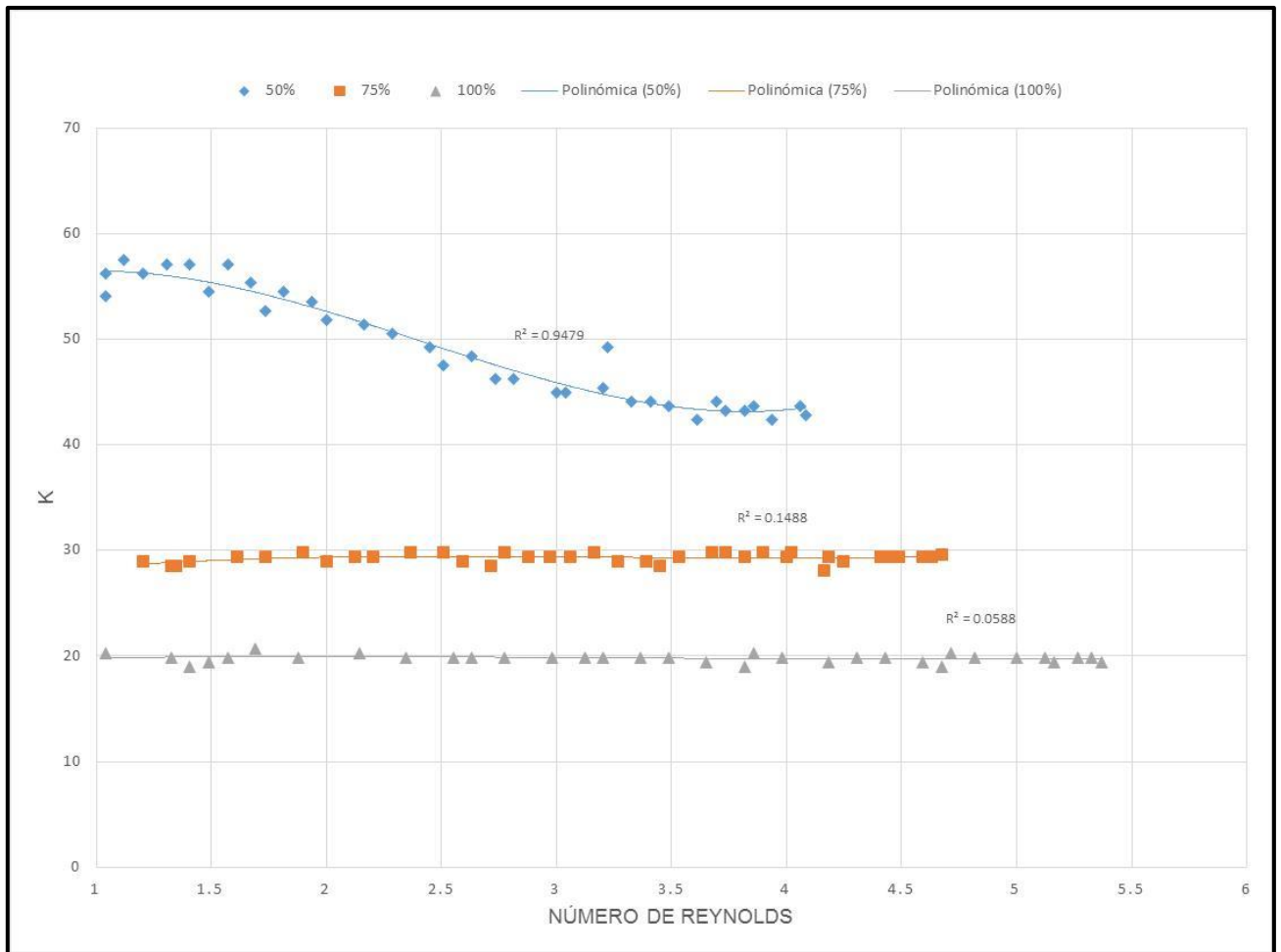


Figura 4.7 Coeficientes K para la válvula de globo de 13mm.

Tabla 4.5 Números de Reynolds contra coeficientes K para válvula de globo de 25mm, [Fuentes y Rosales, 2004].

50% Abierta		75% Abierta		100% Abierta	
K	Re	K	Re	K	Re
26.15	1.05	17.25	1.02	17.50	1.17
25.38	1.07	16.75	1.04	17.79	2.24
24.74	1.08	17.75	1.64	17.76	3.71
28.21	1.08	17.80	2.89	21.12	3.77
27.18	1.13	17.80	3.42	17.52	4.08
27.05	1.13	17.80	3.84	19.95	1.10
25.90	1.17	17.85	3.91	19.29	1.12
25.38	1.20	17.90	4.15	18.70	1.13
24.36	1.23	17.85	4.20	19.73	1.23
23.85	1.25	17.50	4.24	19.70	1.34
25.90	1.27	17.76	4.31	18.97	1.37
23.59	1.33	19.65	1.10	18.20	1.41
24.62	1.37	19.20	1.25	18.75	1.49
25.64	1.43	19.30	1.57	18.56	1.57
25.77	1.52	18.15	1.72	18.51	1.72
23.08	1.60	18.65	1.80	19.86	1.65
24.10	1.67	19.20	2.15	19.86	1.73
24.10	1.73	18.85	2.31	19.65	1.83
26.28	1.83	18.25	2.49	18.81	1.88
25.13	1.93	19.55	2.64	18.85	2.10
24.10	2.17	19.20	2.77	19.23	2.36
23.85	2.23	19.51	3.25	18.87	2.38
24.10	2.37	17.12	3.50	18.83	2.39
25.13	2.43	18.60	3.57	18.45	2.42
24.36	2.57	18.20	3.76	19.00	2.45
24.87	2.63	18.94	3.84	18.55	2.52
25.38	2.73	18.34	3.93	19.23	2.61
23.59	2.83	18.66	3.96	18.90	2.63
23.33	2.97	19.23	4.01	19.50	2.75
23.97	3.07	18.88	4.05	18.50	3.04
25.13	3.23	18.43	4.10	18.90	3.18
23.59	3.40	18.30	4.32	18.40	3.32
22.56	3.52	21.70	1.04	18.49	3.42
23.33	3.57	21.24	1.06	18.80	3.51
22.82	3.63	21.00	1.06	18.40	3.59
23.08	3.68	20.45	1.07	18.10	3.67
22.82	3.77	20.18	1.08	18.00	4.02
22.31	3.83	21.65	1.18	19.20	4.13
22.56	3.90	20.90	1.19	18.90	4.19
22.05	3.98	20.10	1.33	18.31	4.26
22.05	4.03	20.72	1.41	21.25	1.06
22.31	4.05	20.20	1.82	21.08	1.19
21.92	4.08	20.93	1.94	20.45	1.21
21.15	4.12	20.60	1.95	21.01	1.30
22.31	4.17	21.15	1.99	20.10	1.44
22.18	4.18	21.00	2.54	20.90	1.51
22.31	4.23	20.88	2.66	21.45	1.59
22.18	4.25	20.15	3.11	21.35	1.97
		23.70	1.11	21.60	1.98
		23.65	1.41	20.91	2.00
		22.10	2.97	21.10	2.86
		24.28	1.10	22.40	1.26

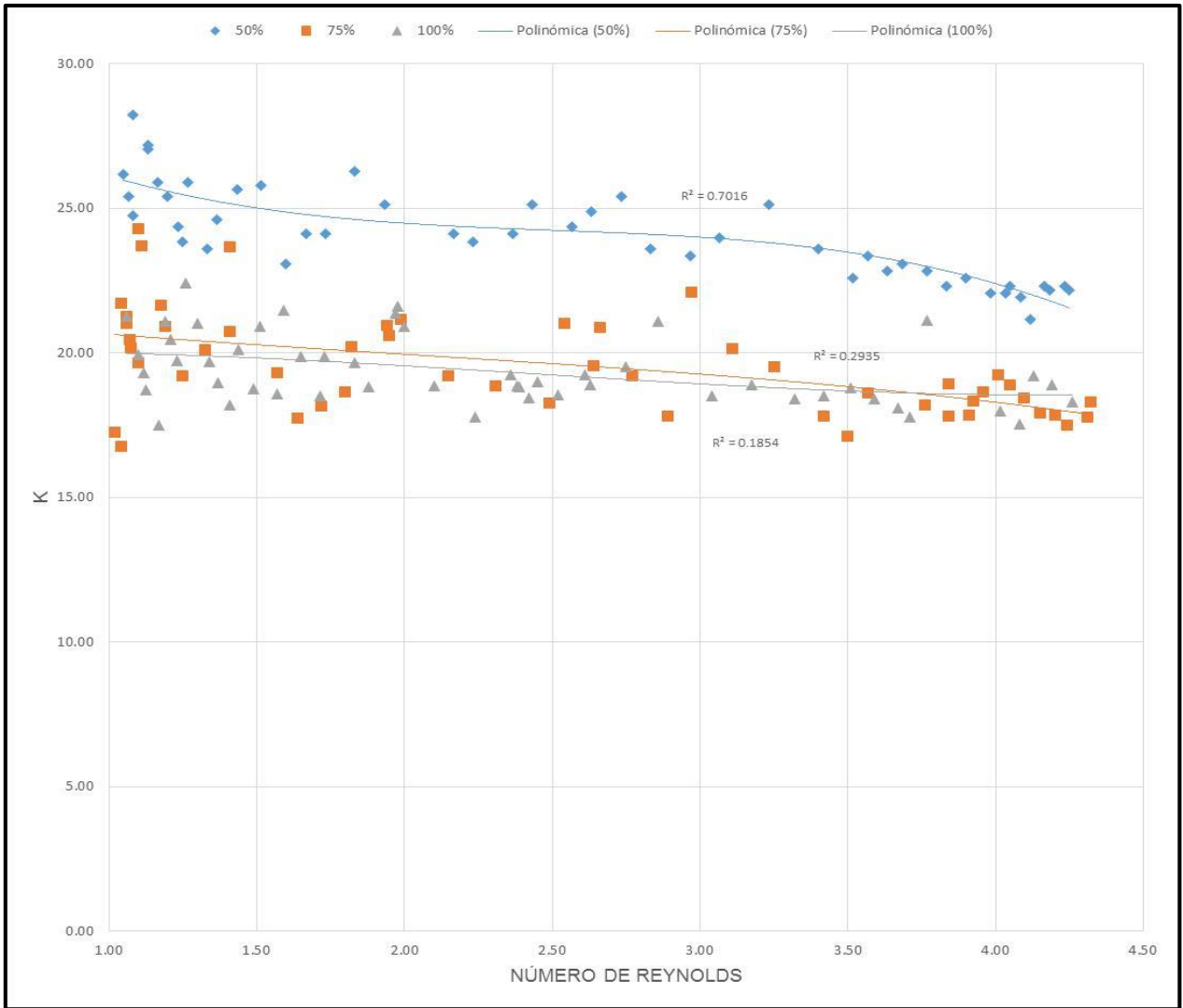


Figura 4.8 Coeficientes K para la válvula de globo de 25mm.

Tabla 4.6 Números de Reynolds contra coeficientes K para "T" de 13, 19 y 25mm, [Fuentes y Rosales, 2004].

Diámetro de 13mm		Diámetro de 19mm		Diámetro de 25mm	
K	Re	K	Re	K	Re
4.13	2.21	1.27	2.64	0.43	3.61
3.67	2.29	0.73	2.79	0.50	3.96
3.20	2.36	0.90	2.89	0.37	4.25
2.80	2.39	0.87	2.93	0.60	4.32
2.73	2.43	0.77	3.11	0.57	4.57
2.60	2.46	0.60	3.32	0.50	4.82
2.60	2.64	0.53	3.46	0.53	5.39
1.27	2.61	1.07	3.50	0.47	5.89
2.13	2.64	0.80	3.64	0.57	6.14
1.90	2.75	0.87	3.75	0.57	6.36
1.47	3.00	0.50	3.93	0.57	6.68
0.80	2.61	0.80	3.93	0.57	6.86
0.93	3.64	0.83	4.93	0.63	7.36
0.90	3.68	0.80	5.00	0.57	7.50
0.83	3.79	0.73	5.21	0.57	7.71
0.63	4.04	0.67	5.43	0.63	7.89
0.53	4.50	0.53	5.43	0.57	8.18
0.40	4.64	0.60	6.18	0.57	8.25
0.27	5.57	0.67	6.54	0.60	8.46
0.67	5.57	0.67	6.61	0.60	8.79
0.23	5.96	0.67	7.07	0.53	8.89
0.20	6.00	0.63	7.29	0.60	9.21
0.47	6.00	0.67	7.64		
0.87	6.18	0.63	7.79		
0.67	7.79	0.53	8.11		
		0.60	9.36		

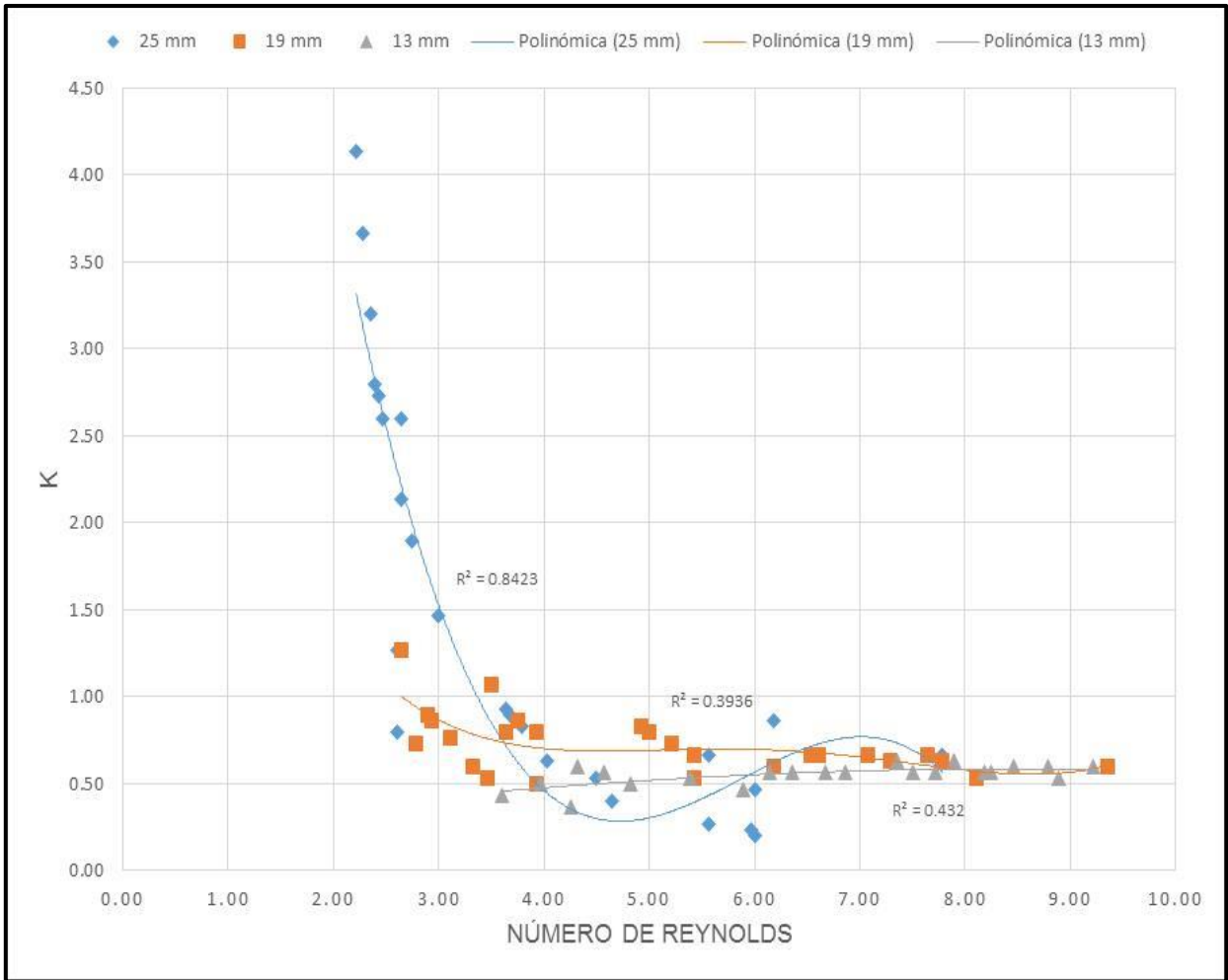


Figura 4.9 Coeficientes K para la "T" de cobre (paso directo).

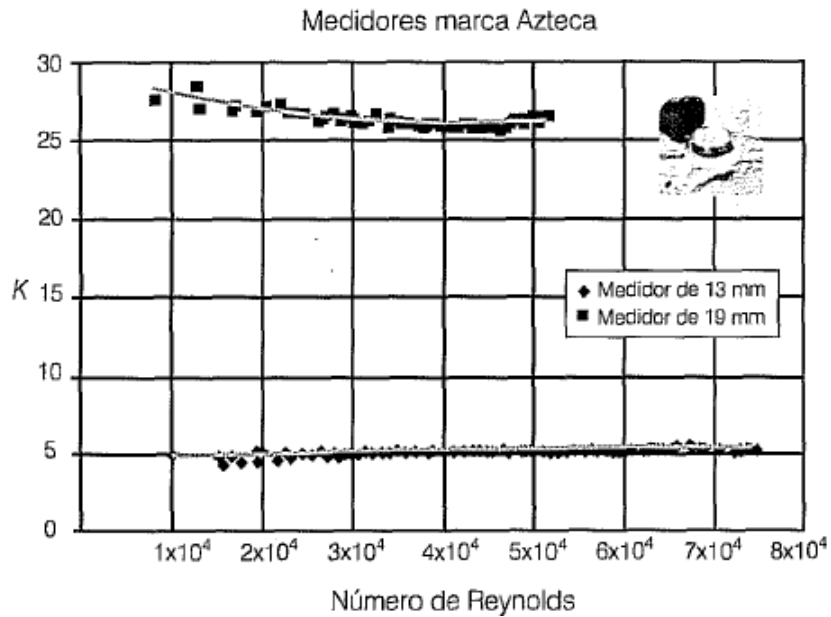


Figura 4.10 Coeficientes K para los medidores marca Azteca, [Fuentes y Rosales, 2004].

En dicho documento también se evalúan las pérdidas locales en una toma domiciliaria teóricamente, utilizando valores teóricos del coeficiente K propuestos por diversos autores. En la tabla 4.7 se puede ver una comparativa entre los valores teóricos y los obtenidos en el laboratorio, incluyendo todos los accesorios estudiados, a excepción de los datos para un diámetro de 25mm. Se consideró la válvula de compuerta completamente abierta.

Tabla 4.7 Comparativa de los coeficientes K experimentales y teóricos, [Fuentes y Rosales, 2004].

Accesorio	K experimental		K teórico	
	Ø 13 mm	Ø 19 mm	Ø 13 mm	Ø 19 mm
Codo	1	1.3	1	1
Te	0.5	0.8	1.5	1.5
Válvula de globo	20	35	10	10
Medidor	5	35	5.5	7.1
Σ (accesorio)	26.5	72.1	18	19.6
Σ (toda la toma)	28.5	74.7	20	21.6

Se puede apreciar la diferencia de resultados en la tabla 4.8, se utiliza la última fila de la tabla 4.7, ya que son las sumatorias de los coeficientes K de los accesorios en estudio.

Tabla 4.8 Resultados de las pérdidas de carga locales en una toma domiciliaria, [Fuentes y Rosales, 2004].

Q (l/s)	Pérdidas de carga locales (mca)			
	Experimental		Teórica	
	\varnothing 13 mm	\varnothing 19 mm	\varnothing 13 mm	\varnothing 19 mm
0.2	3.30	1.89	2.31	0.55
0.4	13.19	7.58	9.26	2.19

En el caso de una toma de 13mm y un gasto de 0.20 l/s existe una diferencia de 1mca, sin embargo al aumentar a 0.4 l/s el gasto son casi 4mca la diferencia entre el K teórico y el K experimental. En general, los cálculos de pérdida de carga de presión empleando el K teórico son menores al obtenido con los datos experimentales, estas diferencias no se están considerando en el diseño de tomas domiciliarias, cabe señalar que conforme el gasto que fluye en las instalaciones es mayor las pérdidas que se generan son mayores. Por lo que es necesario considerar en el diseño de las redes de distribución de agua potable las pérdidas totales en las tomas domiciliarias.

5. Método de cálculo de redes de tuberías a presión.

En este capítulo se presenta el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Sánchez y Fuentes, 1991]. Se enlistan los pasos a seguir para calcular cada uno de los coeficientes que se requieren en las tuberías (número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α). Por último se incluye un ejemplo de la aplicación del método al resolver una red de tuberías de agua potable.

5.1 Método de Sánchez-Fuentes.

En condiciones normales, una red hidráulica que funciona a presión, puede estar sometida a constantes de variaciones de gastos, sin embargo, la suposición de flujo permanente puede tomarse como válida para simplificar el análisis y modelación de una red.

El método de Sánchez-Fuentes es un procedimiento iterativo desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM [Sánchez y Fuentes, 1991], el cual ha sido aplicado con éxito a redes de hasta 500 tubos como la de la ciudad de México.

Para determinar la solución de la red, el procedimiento parte de ciertos gastos, los cuales pueden ser asignados arbitrariamente pero con coherencia. Con dichos gastos y las características de cada tubería se forma el sistema de ecuaciones del flujo en la red, expresado en términos de las cargas hidráulicas en cada nudo. Una vez que el sistema se ha resuelto, se determinan nuevas cargas hidráulicas en cada nudo, con lo cual es posible calcular nuevos gastos en cada tubo mediante una ecuación basada en el Método de Newton- Rapshon. El procedimiento se repite hasta cumplir con cierta tolerancia entre los gastos de una iteración y otra.

El método Sánchez-Fuentes, considera que la ecuación $f(Q)$, si se desarrolla hasta la primera derivada mediante la serie de Taylor, se obtiene la siguiente expresión:

$$f(Q + \Delta Q) = f(Q) + f'(Q)\Delta Q \quad (5.1)$$

Sea la función:

$$f(Q) = C|Q|Q = h_s^{k+1} - h_i^{k+1}$$

CASO 1

$$\boxed{\text{Para } Q > 0; \quad |Q|Q = Q^2}$$

La ecuación 4.19 queda:

$$f(Q) = CQ^2 \quad (5.2)$$

Su primera derivada es:

$$f'(Q) = 2CQ \quad (5.3)$$

La ecuación 5.1 se puede escribir como:

$$f(Q + \Delta Q) = CQ^2 + 2CQ\Delta Q \quad (5.4)$$

Considerando que $Q = Q^k$ y $\Delta Q = Q^{k+1} - Q^k$ donde k es un superíndice que representa el número de iteración, la ecuación 5.4 queda:

$$f(Q + \Delta Q) = C(Q^k)^2 + 2CQ^k(Q^{k+1} - Q^k) \quad (5.5)$$

Reduciendo queda:

$$f(Q + \Delta Q) = -C(Q^k)^2 + 2CQ^k(Q^{k+1}) \quad (5.6)$$

Como $f(Q + \Delta Q) = f(Q^{k+1}) = h_s^{k+1} - h_i^{k+1}$

Sustituyendo en la ecuación 5.4 las expresiones anteriores:

$$h_s^{k+1} - h_i^{k+1} = -C(Q^k)^2 + 2CQ^kQ^{k+1} \quad (5.7)$$

Despejando Q^{k+1} tenemos que:

$$Q^{k+1} = \frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2CQ^k} + \frac{Q^k}{2} \quad (5.8)$$

CASO 2

$$\text{Para } Q < 0; \quad |Q|Q = -Q^2$$

Realizando un procedimiento similar al anterior se llega a la siguiente expresión:

$$h_s^{k+1} - h_i^{k+1} = -C(Q^k)^2 - 2C(Q^k)(Q^{k+1} - Q^k) \quad (5.9)$$

Despejando Q^{k+1} tenemos que:

$$Q^{k+1} = -\frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2CQ^k} + \frac{Q^k}{2} \quad (5.10)$$

Las ecuaciones 5.8 y 5.10 se pueden reunir en la expresión que se escribe a continuación:

$$Q^{k+1} = \frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2C|Q^k|} + \frac{Q^k}{2} \quad (5.11)$$

Si se considera

$$\alpha^k = \frac{1}{2C|Q^k|} \quad (5.12)$$

Conforme k aumenta, Q^k y Q^{k+1} tienden a ser iguales.

5.2 Aplicación del método Sánchez y Fuentes para una red de tuberías de agua potable.

Utilizando la red de tuberías de agua potable planteada en el capítulo 4, cuyo esquema se muestra a continuación:

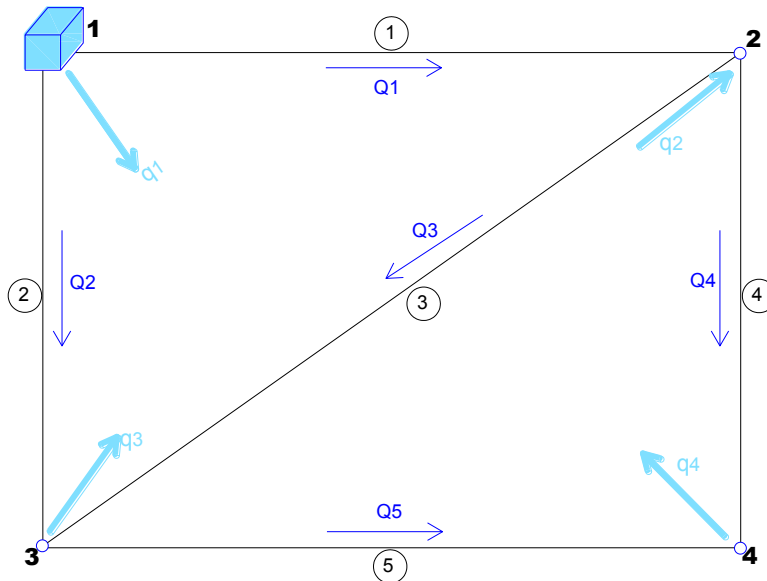


Figura 5.1 Red de tuberías, 5 nudos.

Retomando las ecuaciones no lineales que se generan de esta red de tuberías:

$$-Q_1 - Q_2 = q_1 \quad \text{Nudo 1} \quad (4.12)$$

$$Q_1 - Q_3 - Q_4 = -q_2 \quad \text{Nudo 2} \quad (4.13)$$

$$Q_2 + Q_3 - Q_5 = q_3 \quad \text{Nudo 3} \quad (4.14)$$

$$Q_5 + Q_4 = q_4 \quad \text{Nudo 4} \quad (4.15)$$

Nudo 1:

$$-K_1(h_1 - h_2)^{1/2} - K_2(h_1 - h_3)^{1/2} = q_1 \quad (4.28)$$

Nudo 2:

$$K_1(h_1 - h_2)^{1/2} - K_3(h_2 - h_3)^{1/2} - K_4(h_2 - h_4)^{1/2} = -q_2 \quad (4.29)$$

Nudo 3:

$$K_2(h_1 - h_3)^{1/2} + K_3(h_2 - h_3)^{1/2} - K_5(h_3 - h_4)^{1/2} = q_3 \quad (4.30)$$

Nudo 4:

$$K_4(h_2 - h_4)^{1/2} + K_5(h_3 - h_4)^{1/2} = q_4 \quad (4.31)$$

Se tiene como incógnitas a h_2, h_3 y h_4 (en el nudo 1 la carga es conocida, y sirve como nivel de referencia para las demás). Los datos que conocemos de la red son los siguientes:

$$D = 6'' = 0.1524m$$

$$Q = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_1 = 100m \text{ (carga del tanque)}$$

$$L = 100m$$

Es importante señalar que para este ejemplo no se consideran las pérdidas locales, sólo las perdidas por fricción.

- 1) En este método en primer lugar consistió en obtener e identificar los datos de las tuberías de la red, como el diámetro ($D=m$), la viscosidad, la rugosidad absoluta y establecer un gasto ($Q^k = m^3/s$) para cada uno de los tubos de la red. Se procede a calcular el número de Reynolds con la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{4 Q^k}{\pi D v} \quad (5.13)$$

A continuación se calcula el coeficiente de fricción (f) con la siguiente expresión propuesta por Swamee y Jain (1976), se tomo dicha ecuación ya que muestra un muy buen comportamiento para cualquier tamaño de tubería y dentro de un intervalo práctico de velocidad media de 0.40 m/s a 3.5 m/s, con un error de +0.63% y aplicable a tuberías lisas, de transición y rugosas esto es para flujo laminar, de transición y turbulento.

2) y empleando el número de Reynolds anteriormente calculado:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.75}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.14)$$

Dónde:

e rugosidad absoluta de la tubería.

D es el diámetro de la tubería (m).

3) Después se procede a obtener el valor de (C) con la siguiente ecuación:

$$C^k = 0.0826 \frac{f L}{d^5} \quad (5.15)$$

4) En seguida se calcula α para cada tubo con la ecuación 5.12 mostrada anteriormente:

$$\alpha^k = \frac{1}{2C|Q^k|} \quad (5.16)$$

En la siguiente tabla se muestran los cálculos realizados de los pasos anteriores:

Tabla 5.1 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada conexión.

conexión	Gasto (m ³ /s)	Diámetro (m)	v (m ² /s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
2	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
3	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
4	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
5	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
Gasto del tanque (T)	0.035								

Una vez obtenido el valor de α , se procede a formar el sistema de ecuaciones lineales para su posterior resolución que es en lo que consiste este método del instituto de ingeniería para resolver una red de tuberías funcionando a presión. El sistema de ecuaciones lineales será expresado de forma matricial.

- 5) Se forma la matriz de coeficientes A. Se presentan los pasos para estructurar dicha matriz.
 - a) Las variables serán las cargas totales en cada nudo (h_n).
 - b) El sistema de ecuaciones lineales, será una matriz de coeficientes cuadrada. Cada ecuación del sistema corresponderá a un nudo (n).
 - c) Se verifica que el número de ecuaciones que se tienen sea siempre igual al número de nudos totales de la red menos el número de nudos en donde se conoce la carga (T).
 - d) El valor del coeficiente amn en la diagonal principal es igual a la suma de los factores “alfas” con **signo negativo**, de todos los tubos que se conectan al nudo del que se esté tratando ($-\sum \alpha$).
 - e) En cada ecuación, se debe observar cuáles son los nudos (m) a los que se conecta el nudo (n) que corresponde a la ecuación y en ese lugar se anotará el valor de alfa α_j que corresponda al tubo j que une los dos nudos (n con m). Siempre con signo positivo. Los demás coeficientes tendrán un valor de cero.

- 6) El segundo paso consiste en obtener los términos independientes b del sistema de ecuaciones, a continuación se describa la manera de hacerlo.
 - f) El término independiente será siempre $\frac{q_n}{2}$ con signo positivo si el gasto sale del nudo o con signo negativo si entra al nudo. Si el nudo al que corresponde la ecuación se une a otro en el que se conozca la carga (T), entonces en el término independiente se debe agregar el producto de la carga con el factor alfa que corresponde al tubo (j) con el que están unidos los dos tubos. Siempre con signo negativo $-\alpha_j h_T$.

El sistema de ecuaciones lineales queda de la siguiente manera:

Nudo 2:

$$(-\alpha_1^k - \alpha_3^k - \alpha_4^k)h_2^{k+1} + \alpha_3^k h_3^{k+1} + \alpha_4^k h_4^{k+1} = -\frac{q_2}{2} - \alpha_1^k h_1 \quad (5.17)$$

Nudo 3:

$$\alpha_3^k h_2^{k+1} + (-\alpha_2^k - \alpha_3^k - \alpha_5^k)h_3^{k+1} + \alpha_5^k h_4^{k+1} = \frac{q_3}{2} - \alpha_2^k h_1 \quad (5.18)$$

Nudo 4:

$$\alpha_4^k h_2^{k+1} + \alpha_5^k h_3^{k+1} + (-\alpha_4^k - \alpha_5^k)h_4^{k+1} = \frac{q_4}{2} \quad (5.19)$$

- g) Revisar que la matriz de coeficientes formada sea simétrica y que la suma algebraica de los coeficientes de cada renglón sea cero, excepto cuando se trata de la ecuación de un nudo conectado a un nudo de carga conocida.

En la primera iteración la matriz de coeficientes formada es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} -0.106 & 0.035 & 0.035 \\ 0.035 & -0.106 & 0.035 \\ 0.035 & 0.035 & -0.071 \end{bmatrix}$$

Y la matriz formada de términos independientes:

$$\begin{bmatrix} -3.540 \\ -3.540 \\ -0.007 \end{bmatrix}$$

- 7) Ahora se resuelve el sistema de ecuaciones lineales para poder conocer h^{k+1} . Existen diversos métodos para ello teniendo en cuenta que cada uno tiene sus pros y sus contras, como el de la matriz inversa, el de Gauss-Seidel, entre otros. Para mayor facilidad se programa en excel, así las iteraciones son mucho más rápidas.

Para resolver el sistema de ecuaciones se programó en Excel el método de Gauss- Seidel, ya que este método nos permite trabajar con una gran cantidad de datos, así mismo nos brinda mayor facilidad en el proceso iterativo. A continuación se muestran una serie de tablas donde se aprecian los resultados de la primera iteración:

Tabla 5.2 Cargas en los nudos obtenidas a partir del primer proceso iterativo.

K=0	
h2	99.80246
h3	99.80246
h4	99.70369
h1	100.00000

En seguida se calculan los gastos Q_j^{k+1} los cuales remplazaran a los gastos propuestos al inicio Q^k con la ecuación 5.11.

$$Q^{k+1} = \frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2C|Q^k|} + \frac{Q^k}{2} \quad (5.20)$$

Tabla 5.3 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01050
2	0.01050
3	0.00350
4	0.00700
5	0.00700
Total	0.03850

Una vez que obtuvimos los nuevos gastos se calcula nuevamente los pasos anteriores, en la tabla 5.4 se muestran dichos cálculos.

Tabla 5.4 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos.

K=1									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.01050	0.1524	0.000001	87723.197	0.00001	0.0184	100	1846.510	0.026
2	0.01050	0.1524	0.000001	87723.197	0.00001	0.0184	100	1846.510	0.026
3	0.00350	0.1524	0.000001	29241.066	0.00001	0.0235	100	2364.393	0.060
4	0.00700	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
5	0.00700	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
Gasto del tanque (T)	0.0385								

Conforme se van realizando las iteraciones (k), Q^k y Q^{k+1} tienden a ser iguales y en el momento en que estos dos son prácticamente iguales termina el cálculo, tal como se puede apreciar en las siguientes dos tablas.

Tabla 5.5 Cargas en los nudos, iteración k=3.

K=3	
h2	99.80622
h3	99.78641
h4	99.69732
h1	100.00000

Tabla 5.6 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01021
2	0.01079
3	0.00282
4	0.00739
5	0.00661
Total	0.03782

Tabla 5.7 Cargas en los nudos, iteración k=4.

K=4	
h2	99.80622
h3	99.78641
h4	99.69732
h1	100.00000

Tabla 5.8 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01021
2	0.01079
3	0.00282
4	0.00739
5	0.00661
Total	0.03782

Por último se presentan los resultados de todas las iteraciones programadas en Excel.

Tabla 5.9 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos, $K=0$.

K=0									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
2	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
3	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
4	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
5	0.007	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
Gasto del tanque (T)	0.035								

Tabla 5.10 Matriz de coeficientes A y términos independientes, iteración K=0.

-0.106	0.035	0.035		-3.54004
0.035	-0.106	0.035		-3.54004
0.035	0.035	-0.071		0.00700

Tabla 5.11 Cargas en los nudos, iteración k=0.

K=0	
h2	99.80246
h3	99.80246
h4	99.70369
h1	100.00000

Tabla 5.12 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=0.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01050
2	0.01050
3	0.00350
4	0.00700
5	0.00700
Total	0.03850

Tabla 5.13 Cálculos del número de Reynolds Re, factor de fricción f, coeficiente C y coeficiente α para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos, K=1.

K=1									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.01050	0.1524	0.000001	87723.197	0.00001	0.0184	100	1846.510	0.026
2	0.01050	0.1524	0.000001	87723.197	0.00001	0.0184	100	1846.510	0.026
3	0.00350	0.1524	0.000001	29241.066	0.00001	0.0235	100	2364.393	0.060
4	0.00700	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
5	0.00700	0.1524	0.000001	58482.131	0.00001	0.0201	100	2015.739	0.035
Gasto del tanque (T)	0.0385								

Tabla 5.14 Matriz de coeficientes A y términos independientes, iteración K=1.

-0.122	0.060	0.035		-2.57887
0.060	-0.122	0.035		-2.57537
0.035	0.035	-0.071		0.00700

Tabla 5.15 Cargas en los nudos, iteración k=1.

K=1	
h2	99.80603
h3	99.78681
h4	99.69765
h1	100.00000

Tabla 5.16 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=1.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01025
2	0.01075
3	0.00291
4	0.00734
5	0.00666
Total	0.03791

Tabla 5.17 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente a para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos, $K=2$.

K=2									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	a
1	0.01025	0.1524	0.000001	85652.260	0.00001	0.0185	100	1855.877	0.026
2	0.01075	0.1524	0.000001	89794.134	0.00001	0.0183	100	1837.431	0.025
3	0.00291	0.1524	0.000001	24324.519	0.00001	0.0246	100	2472.269	0.069
4	0.00734	0.1524	0.000001	61327.742	0.00001	0.0199	100	1994.727	0.034
5	0.00666	0.1524	0.000001	55636.521	0.00001	0.0203	100	2038.161	0.037
Gasto del tanque (T)	0.037911515								

Tabla 5.18 Matriz de coeficientes A y términos independientes, iteración $K=2$.

-0.130	0.069	0.034		-2.62789
0.069	-0.132	0.037		-2.52834
0.034	0.037	-0.071		0.00700

Tabla 5.19 Cargas en los nudos, iteración $K=2$.

K=2	
h2	99.80621
h3	99.78642
h4	99.69733
h1	100.00000

Tabla 5.20 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, $K=2$.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01022
2	0.01078
3	0.00283
4	0.00739
5	0.00661
Total	0.03783

Tabla 5.21 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente a para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos, $K=3$.

K=3									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	a
1	0.01022	0.1524	0.000001	85372.386	0.00001	0.0185	100	1857.166	0.026
2	0.01078	0.1524	0.000001	90074.008	0.00001	0.0183	100	1836.225	0.025
3	0.00283	0.1524	0.000001	23646.231	0.00001	0.0248	100	2489.496	0.071
4	0.00739	0.1524	0.000001	61726.155	0.00001	0.0198	100	1991.889	0.034
5	0.00661	0.1524	0.000001	55238.108	0.00001	0.0203	100	2041.422	0.037
Gasto del tanque (T)	0.037830328								

Tabla 5.22 Matriz de coeficientes A y términos independientes, iteración $K=3$.

-0.131	0.071	0.034		-2.63467
0.071	-0.133	0.037		-2.52213
0.034	0.037	-0.071		0.00700

Tabla 5.23 Cargas en los nudos, iteración k=3.

K=3	
h2	99.80622
h3	99.78641
h4	99.69732
h1	100.00000

Tabla 5.24 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=3.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01021
2	0.01079
3	0.00282
4	0.00739
5	0.00661
Total	0.03782

Tabla 5.25 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada conexión, con los nuevos gastos obtenidos, $k=4$.

K=4									
conexión	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.01021	0.1524	0.000001	85340.524	0.00001	0.0185	100	1857.313	0.026
2	0.01079	0.1524	0.000001	90105.870	0.00001	0.0183	100	1836.088	0.025
3	0.00282	0.1524	0.000001	23567.200	0.00001	0.0248	100	2491.547	0.071
4	0.00739	0.1524	0.000001	61773.323	0.00001	0.0198	100	1991.554	0.034
5	0.00661	0.1524	0.000001	55190.939	0.00001	0.0203	100	2041.810	0.037
Gasto del tanque (T)	0.037820868								

Tabla 5.26 Matriz de coeficientes A y términos independientes, iteración K=4.

-0.131	0.071	0.034		-2.63545
0.071	-0.133	0.037		-2.52143
0.034	0.037	-0.071		0.00700

Tabla 5.27 Cargas en los nudos, iteración k=4.

K=4	
h2	99.80622
h3	99.78641
h4	99.69732
h1	100.00000

Tabla 5.28 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=4.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.01021
2	0.01079
3	0.00282
4	0.00739
5	0.00661
Total	0.03782

Los resultados finales de la red:

Tabla 5.9 Diferencias de carga en cada tubería.

Tubería	Diferencia de carga (m)
1	h_1-h_2 0.19378028
2	h_1-h_3 0.21359119
3	h_2-h_3 0.01981091
4	h_2-h_4 0.10889807
5	h_3-h_4 0.08908717

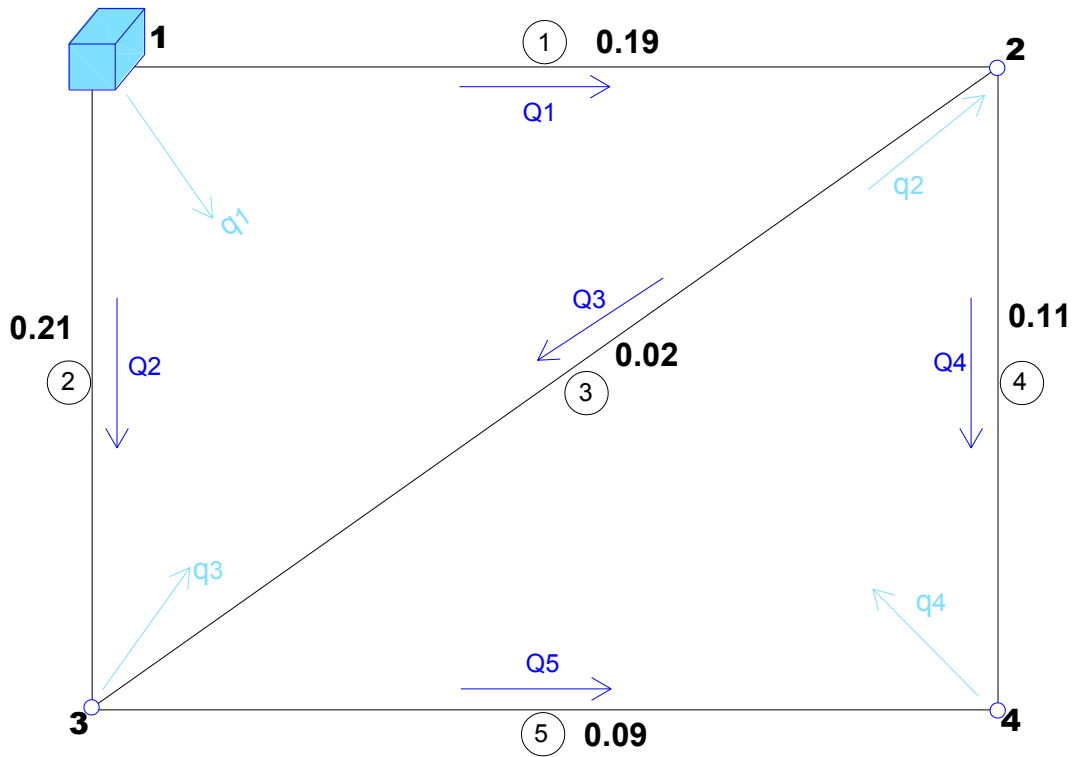


Figura 5.2 Diagrama de la red con diferencias de cargas en cada tubería.

6. Ejemplos de aplicación de cálculo de redes a presión con y sin pérdidas locales.

En el presente capítulo se presentan dos ejemplos del cálculo de una red a presión, en el primero sin considerar las pérdidas locales y en el segundo se toman en cuenta dichas pérdidas. Se muestra el esquema de la red calculada, y una serie de tablas de Excel generadas de la programación de valores y ecuaciones para resolver las dos redes. También se incluyen algunas tablas para comparar la pérdida de carga en la red en la que si se consideraron las pérdidas locales y en la que no, así como diagramas de la red con diferencias de cargas en cada tubería. Se incluye la red a presión modelada con el paquete Epanet. Con base en los resultados obtenidos se obtuvieron algunas conclusiones que se plasmaran en el último capítulo.

6.1 Datos de la red a presión y planteamiento del sistema de ecuaciones para su resolución.

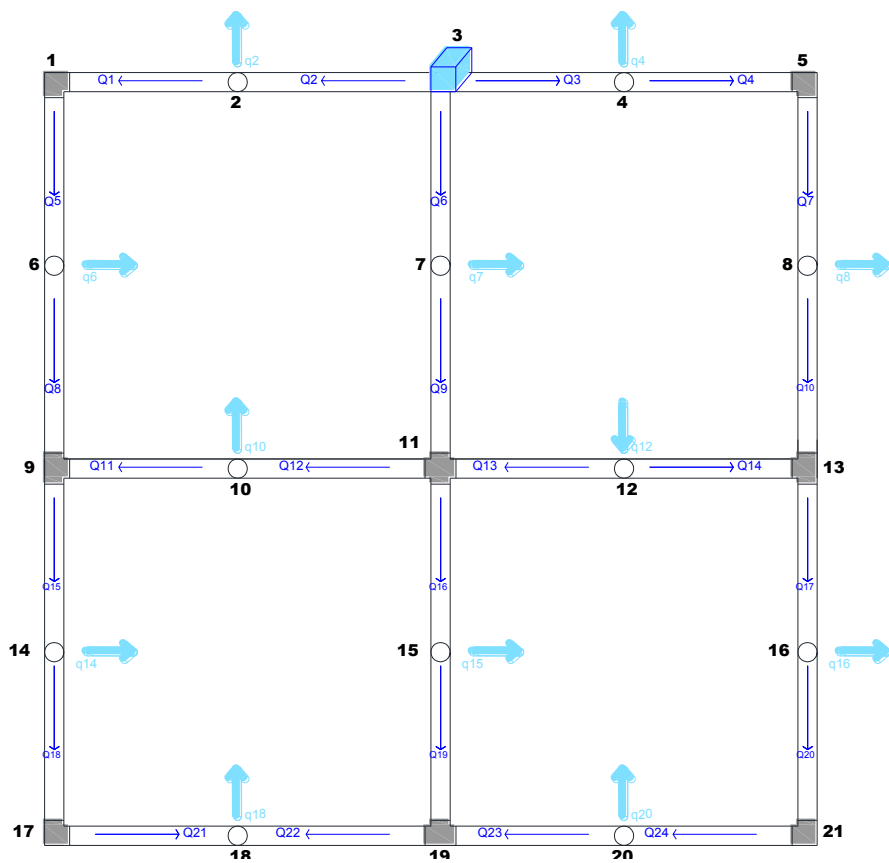


Figura 6.1 Esquema de la red a presión, 21 nudos (ejemplo).

Se tiene como incógnitas a:

$h_1, h_2, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8, h_9, h_{10}, h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}, h_{15}, h_{16}, h_{17}, h_{18}, h_{19}, h_{20}, h_{21}$ (en el nudo 3 la carga es conocida, y sirve como nivel de referencia para las demás). Los datos que se conocen de la red son los siguientes:

$$D = 3/4" = 19mm = 0.019m$$

$$Q = 14 \text{ l/s} = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_3 = 100m \text{ (carga del tanque)}$$

$$L = 5m$$

$$e = 0.0015mm = 0.0000015m \text{ (rugosidad absoluta de la tubería)}$$

$$\nu = 1 \times 10^{-6} = 0.000001 \text{ m}^2/\text{s} \text{ (viscosidad cinemática del agua)}$$

Sistema de ecuaciones no lineales que se generan de la red de tuberías:

$$Q_1 - Q_5 = q_1$$

$$-Q_1 + Q_2 = q_2$$

$$Q_3 - Q_4 = q_4$$

$$Q_4 - Q_7 = q_5$$

$$Q_5 - Q_8 = q_6$$

$$Q_6 - Q_9 = q_7$$

$$Q_7 - Q_{10} = q_8$$

$$Q_8 - Q_{11} + Q_{15} = q_9$$

$$Q_{11} + Q_{12} = q_{10}$$

$$Q_9 - Q_{12} - Q_{13} + Q_{16} = q_{11}$$

$$Q_{13} + Q_{14} = q_{12}$$

$$Q_{10} - Q_{14} + Q_{17} = q_{13}$$

$$-Q_{15} + Q_{18} = q_{14}$$

$$-Q_{16} + Q_{19} = q_{15}$$

$$-Q_{17} + Q_{20} = q_{16}$$

$$-Q_{18} + Q_{21} = q_{17}$$

$$-Q_{21} - Q_{22} = q_{18}$$

$$-Q_{19} + Q_{22} + Q_{23} = q_{19}$$

$$-Q_{23} - Q_{24} = q_{20}$$

$$-Q_{20} + Q_{24} = q_{21}$$

Gastos de entrada y salida de la red de tuberías.

$$q_1 = 0 \qquad q_{12} = -0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_2 = 0.003 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{13} = 0$$

$$q_4 = 0.002 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{14} = 0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_5 = 0 \qquad q_{15} = 0.0007 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_6 = 0.001 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{16} = 0.0006 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_7 = 0.003 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{17} = 0$$

$$q_8 = 0.0006 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{18} = 0.003 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_9 = 0 \qquad q_{19} = 0$$

$$q_{10} = 0.0001 \text{ m}^3/\text{s} \qquad q_{20} = 0.0003 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_{11} = 0 \qquad q_{21} = 0$$

6.2 Red de tuberías a presión sin pérdidas locales.

A continuación se resuelve la red de tuberías empleando el método de Sánchez-Fuentes, es importante señalar que solo se toman en cuenta las pérdidas por fricción.

Para comenzar a resolver la red retomamos el sistema de ecuaciones no lineales que se plantearon anteriormente en aquellos nudos donde no se conoce la carga (suponiendo los sentidos de flujo en la tubería de acuerdo a la figura 6.1). A continuación se muestra dicho sistema de ecuaciones:

$$Q_1 - Q_5 = 0 \quad \text{Nudo 1}$$

$$Q_2 - Q_1 = 0.003 \quad \text{Nudo 2}$$

$$Q_3 - Q_4 = 0.002 \quad \text{Nudo 4}$$

$$Q_4 - Q_7 = 0 \quad \text{Nudo 5}$$

$$Q_5 - Q_8 = 0.001 \quad \text{Nudo 6}$$

$$Q_6 - Q_9 = 0.003 \quad \text{Nudo 7}$$

$$Q_7 - Q_{10} = 0.0006 \quad \text{Nudo 8}$$

$$Q_8 - Q_{11} + Q_{15} = 0 \quad \text{Nudo 9}$$

$$Q_{11} + Q_{12} = 0.0001 \quad \text{Nudo 10}$$

$$Q_9 - Q_{12} - Q_{13} + Q_{16} = 0 \quad \text{Nudo 11}$$

$$Q_{13} + Q_{14} = -0.0005 \quad \text{Nudo 12}$$

$$Q_{10} - Q_{14} + Q_{17} = 0 \quad \text{Nudo 13}$$

$$-Q_{15} + Q_{18} = 0.0004 \quad \text{Nudo 14}$$

$$-Q_{16} + Q_{19} = 0.0007 \quad \text{Nudo 15}$$

$$-Q_{17} + Q_{20} = 0.0006 \quad \text{Nudo 16}$$

$$-Q_{18} + Q_{21} = 0 \quad \text{Nudo 17}$$

$$-Q_{21} - Q_{22} = 0.003 \quad \text{Nudo 18}$$

$$-Q_{19} + Q_{22} + Q_{23} = 0 \quad \text{Nudo 19}$$

$$-Q_{23} - Q_{24} = 0.0003 \quad \text{Nudo 20}$$

$$-Q_{20} + Q_{24} = 0 \quad \text{Nudo 21}$$

Enseguida se forma la matriz de coeficientes A, para ello se siguieron los pasos descritos en el capítulo 5, obteniendo un sistema de ecuaciones lineales:

$$(-\alpha_1^k - \alpha_5^k)h_1^{k+1} + \alpha_1^k h_2^{k+1} + \alpha_5^k h_6^{k+1} = \frac{q_1}{2} \quad \text{Nudo 1}$$

$$\alpha_1^k h_1^{k+1} + (-\alpha_1^k - \alpha_2^k)h_2^{k+1} = \frac{q_2}{2} - \alpha_2^k h_3^{k+1} \quad \text{Nudo 2}$$

$$(-\alpha_3^k - \alpha_4^k)h_4^{k+1} + \alpha_4^k h_5^{k+1} = \frac{q_4}{2} - \alpha_3^k h_3^{k+1} \quad \text{Nudo 4}$$

$$\alpha_4^k h_4^{k+1} + (-\alpha_4^k - \alpha_7^k)h_5^{k+1} + \alpha_7^k h_8^{k+1} = \frac{q_5}{2} \quad \text{Nudo 5}$$

$$\alpha_5^k h_1^{k+1} + (-\alpha_5^k - \alpha_8^k)h_6^{k+1} + \alpha_8^k h_9^{k+1} = \frac{q_6}{2} \quad \text{Nudo 6}$$

$$(-\alpha_6^k - \alpha_9^k)h_7^{k+1} + \alpha_9^k h_{11}^{k+1} = \frac{q_7}{2} - \alpha_6^k h_3^{k+1} \quad \text{Nudo 7}$$

$$\alpha_7^k h_5^{k+1} + (-\alpha_7^k - \alpha_{10}^k)h_8^{k+1} + \alpha_{10}^k h_{13}^{k+1} = \frac{q_8}{2} \quad \text{Nudo 8}$$

$$\alpha_8^k h_6^{k+1} + (-\alpha_8^k - \alpha_{11}^k - \alpha_{15}^k)h_9^{k+1} + \alpha_{11}^k h_{10}^{k+1} + \alpha_{15}^k h_{14}^{k+1} = \frac{q_9}{2} \quad \text{Nudo 9}$$

$$\alpha_{11}^k h_9^{k+1} + (-\alpha_{11}^k - \alpha_{12}^k)h_{10}^{k+1} + \alpha_{12}^k h_{11}^{k+1} = \frac{q_{10}}{2} \quad \text{Nudo 10}$$

$$\alpha_9^k h_7^{k+1} + \alpha_{12}^k h_{10}^{k+1} + (-\alpha_9^k - \alpha_{12}^k - \alpha_{13}^k - \alpha_{16}^k)h_{11}^{k+1} + \alpha_{13}^k h_{12}^{k+1} + \alpha_{16}^k h_{15}^{k+1} \\ = \frac{q_{11}}{2} \quad \text{Nudo 11}$$

$$\alpha_{13}^k h_{11}^{k+1} + (-\alpha_{13}^k - \alpha_{14}^k)h_{12}^{k+1} + \alpha_{14}^k h_{13}^{k+1} = -\frac{q_{12}}{2} \quad \text{Nudo 12}$$

$$\alpha_{10}^k h_8^{k+1} + \alpha_{14}^k h_{12}^{k+1} + (-\alpha_{10}^k - \alpha_{14}^k - \alpha_{17}^k)h_{13}^{k+1} + \alpha_{17}^k h_{16}^{k+1} = \frac{q_{13}}{2} \quad \text{Nudo 13}$$

$$\alpha_{15}^k h_9^{k+1} + (-\alpha_{15}^k - \alpha_{18}^k)h_{14}^{k+1} + \alpha_{18}^k h_{17}^{k+1} = \frac{q_{14}}{2} \quad \text{Nudo 14}$$

$$\alpha_{16}^k h_{11}^{k+1} + (-\alpha_{16}^k - \alpha_{19}^k)h_{15}^{k+1} + \alpha_{19}^k h_{19}^{k+1} = \frac{q_{15}}{2} \quad \text{Nudo 15}$$

$$\alpha_{17}^k h_{13}^{k+1} + (-\alpha_{17}^k - \alpha_{20}^k)h_{16}^{k+1} + \alpha_{20}^k h_{21}^{k+1} = \frac{q_{16}}{2} \quad \text{Nudo 16}$$

$$\alpha_{18}^k h_{14}^{k+1} + (-\alpha_{18}^k - \alpha_{21}^k)h_{17}^{k+1} + \alpha_{21}^k h_{18}^{k+1} = \frac{q_{17}}{2} \quad \text{Nudo 17}$$

$$\alpha_{21}^k h_{17}^{k+1} + (-\alpha_{21}^k - \alpha_{22}^k) h_{18}^{k+1} + \alpha_{22}^k h_{19}^{k+1} = \frac{q_{18}}{2} \quad \text{Nudo 18}$$

$$\alpha_{19}^k h_{15}^{k+1} + \alpha_{22}^k h_{18}^{k+1} + (-\alpha_{19}^k - \alpha_{22}^k - \alpha_{23}^k) h_{19}^{k+1} + \alpha_{23}^k h_{20}^{k+1} = \frac{q_{19}}{2} \quad \text{Nudo 19}$$

$$\alpha_{23}^k h_{19}^{k+1} + (-\alpha_{23}^k - \alpha_{24}^k) h_{20}^{k+1} + \alpha_{24}^k h_{21}^{k+1} = \frac{q_{20}}{2} \quad \text{Nudo 20}$$

$$\alpha_{20}^k h_{16}^{k+1} + \alpha_{24}^k h_{20}^{k+1} + (-\alpha_{20}^k - \alpha_{24}^k) h_{21}^{k+1} = \frac{q_{21}}{2} \quad \text{Nudo 21}$$

De acuerdo con el método, se propusieron valores iniciales de los gastos en cada tubería (tabla 6.1):

Tabla 6.1 Gastos propuestos en cada tubería

Tubería	Gasto (m3/s)
1	0.0017
2	0.0047
3	0.0047
4	0.0027
5	0.0017
6	0.0047
7	0.0027
8	0.0007
9	0.0017
10	0.0021
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0003
14	0.0003
15	0.0014
16	0.0011
17	0.0023
18	0.0012
19	0.0004
20	0.0017
21	0.0012
22	0.0018
23	0.0014
24	0.0017

Con los gastos propuestos para cada tubería se calcula la tabla 6.2:

Tabla 6.2 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=0$.

K=0									
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	2,912,935	0.0001
2	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	2,379,790	0.0000
3	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	2,379,790	0.0000
4	0.0027	0.019	0.000001	178,700	0.0000015	0.0159	5	2,649,420	0.0001
5	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	2,912,935	0.0001
6	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	2,379,790	0.0000
7	0.0027	0.019	0.000001	178,700	0.0000015	0.0159	5	2,649,420	0.0001
8	0.0007	0.019	0.000001	44,675	0.0000015	0.0213	5	3,553,890	0.0002
9	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	2,912,935	0.0001
10	0.0021	0.019	0.000001	138,493	0.0000015	0.0167	5	2,787,666	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	46,909	0.0000015	0.0211	5	3,514,648	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	53,610	0.0000015	0.0204	5	3,410,510	0.0002
13	0.0003	0.019	0.000001	16,753	0.0000015	0.0270	5	4,506,084	0.0004
14	0.0003	0.019	0.000001	16,753	0.0000015	0.0270	5	4,506,084	0.0004
15	0.0014	0.019	0.000001	91,584	0.0000015	0.0182	5	3,036,144	0.0001
16	0.0011	0.019	0.000001	74,831	0.0000015	0.0190	5	3,169,782	0.0001
17	0.0023	0.019	0.000001	155,246	0.0000015	0.0163	5	2,724,425	0.0001
18	0.0012	0.019	0.000001	78,181	0.0000015	0.0188	5	3,140,068	0.0001
19	0.0004	0.019	0.000001	27,922	0.0000015	0.0238	5	3,968,100	0.0003
20	0.0017	0.019	0.000001	115,038	0.0000015	0.0174	5	2,895,227	0.0001
21	0.0012	0.019	0.000001	78,181	0.0000015	0.0188	5	3,140,068	0.0001
22	0.0018	0.019	0.000001	122,856	0.0000015	0.0171	5	2,856,411	0.0001
23	0.0014	0.019	0.000001	94,935	0.0000015	0.0181	5	3,013,263	0.0001
24	0.0017	0.019	0.000001	115,038	0.0000015	0.0174	5	2,895,227	0.0001

Tabla 6.3 Cargas en los nudos obtenidas a partir del primer proceso iterativo, $K=0$.

h3	100.00
h1	36.25
h2	45.50
h4	59.06
h5	47.15
h6	26.99
h7	39.96
h8	35.23
h9	24.84
h10	26.34
h11	28.27
h12	28.90
h13	28.97
h14	18.54
h15	20.29
h16	22.49
h17	13.72
h18	8.90
h19	17.71
h20	18.25
h21	20.37

Tabla 6.4 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, $K=0$.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0042
4	0.0022
5	0.0018
6	0.0050
7	0.0022
8	0.0008
9	0.0020
10	0.0016
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0004
14	0.0001
15	0.0014
16	0.0017
17	0.0017
18	0.0012
19	0.0010
20	0.0011
21	0.0012
22	0.0018
23	0.0008
24	0.0011
Total	0.041180

Una vez obtenidos los nuevos gastos se calcula nuevamente el Re , f , C y α para cada conexión, después se calculan las cargas y por último los gastos. Este procedimiento se realiza hasta que los gastos sean prácticamente iguales.

Tabla 6.5 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=1$.

K=1									
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	119,743	0.0000015	0.0172	5	2,871,473	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	320,780	0.0000015	0.0142	5	2,368,529	0.0000
3	0.0042	0.019	0.000001	279,881	0.0000015	0.0146	5	2,429,876	0.0000
4	0.0022	0.019	0.000001	145,856	0.0000015	0.0165	5	2,758,710	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	119,743	0.0000015	0.0172	5	2,871,473	0.0001
6	0.0050	0.019	0.000001	337,515	0.0000015	0.0141	5	2,346,249	0.0000
7	0.0022	0.019	0.000001	145,856	0.0000015	0.0165	5	2,758,710	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	52,730	0.0000015	0.0205	5	3,423,166	0.0002
9	0.0020	0.019	0.000001	136,478	0.0000015	0.0168	5	2,795,943	0.0001
10	0.0016	0.019	0.000001	105,648	0.0000015	0.0177	5	2,946,683	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	43,881	0.0000015	0.0214	5	3,568,478	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	50,582	0.0000015	0.0207	5	3,455,270	0.0002
13	0.0004	0.019	0.000001	27,135	0.0000015	0.0240	5	3,995,606	0.0003
14	0.0001	0.019	0.000001	6,372	0.0000015	0.0352	5	5,874,947	0.0009
15	0.0014	0.019	0.000001	96,611	0.0000015	0.0180	5	3,002,208	0.0001
16	0.0017	0.019	0.000001	113,030	0.0000015	0.0174	5	2,905,759	0.0001
17	0.0017	0.019	0.000001	112,020	0.0000015	0.0175	5	2,911,150	0.0001
18	0.0012	0.019	0.000001	83,209	0.0000015	0.0186	5	3,098,508	0.0001
19	0.0010	0.019	0.000001	66,121	0.0000015	0.0195	5	3,256,039	0.0002
20	0.0011	0.019	0.000001	71,812	0.0000015	0.0192	5	3,198,101	0.0001
21	0.0012	0.019	0.000001	83,209	0.0000015	0.0186	5	3,098,508	0.0001
22	0.0018	0.019	0.000001	117,829	0.0000015	0.0173	5	2,880,984	0.0001
23	0.0008	0.019	0.000001	51,708	0.0000015	0.0206	5	3,438,219	0.0002
24	0.0011	0.019	0.000001	71,812	0.0000015	0.0192	5	3,198,101	0.0001

Tabla 6.6 Cargas en los nudos, K=1.

h3	100.00
h1	35.45
h2	44.96
h4	59.17
h5	47.02
h6	25.93
h7	39.47
h8	34.87
h9	23.63
h10	25.28
h11	27.39
h12	28.24
h13	28.26
h14	16.87
h15	18.36
h16	21.46
h17	11.63
h18	6.39
h19	14.69
h20	16.01
h21	18.73

Tabla 6.7 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=1.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040871

Tabla 6.8 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=2$.

K=2									
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,007	0.0000015	0.0171	5	2,860,469	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,045	0.0000015	0.0142	5	2,365,428	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	274,751	0.0000015	0.0146	5	2,438,380	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	140,726	0.0000015	0.0167	5	2,778,676	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,007	0.0000015	0.0171	5	2,860,469	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,381	0.0000015	0.0140	5	2,342,576	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	140,726	0.0000015	0.0167	5	2,778,676	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	54,994	0.0000015	0.0203	5	3,391,154	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,343	0.0000015	0.0167	5	2,784,222	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	100,518	0.0000015	0.0179	5	2,977,398	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	45,640	0.0000015	0.0212	5	3,536,615	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	52,342	0.0000015	0.0206	5	3,428,840	0.0002
13	0.0005	0.019	0.000001	31,237	0.0000015	0.0232	5	3,862,876	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	2,269	0.0000015	0.0489	5	8,159,783	0.0018
15	0.0015	0.019	0.000001	100,635	0.0000015	0.0178	5	2,976,677	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	118,238	0.0000015	0.0173	5	2,878,934	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	102,787	0.0000015	0.0178	5	2,963,564	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	87,232	0.0000015	0.0184	5	3,067,561	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	71,329	0.0000015	0.0192	5	3,202,773	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	62,580	0.0000015	0.0198	5	3,295,546	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	87,232	0.0000015	0.0184	5	3,067,561	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	113,805	0.0000015	0.0174	5	2,901,663	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	42,476	0.0000015	0.0216	5	3,595,187	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	62,580	0.0000015	0.0198	5	3,295,546	0.0002

Tabla 6.9 Cargas en los nudos, $K=2$.

h3	100.00
h1	35.42
h2	44.94
h4	59.18
h5	47.02
h6	25.90
h7	39.46
h8	34.87
h9	23.59
h10	25.25
h11	27.37
h12	28.24
h13	28.24
h14	16.81
h15	18.29
h16	21.44
h17	11.55
h18	6.29
h19	14.58
h20	15.93
h21	18.69

Tabla 6.10 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=2.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040831

Tabla 6.11 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, K=3.

K=3									
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,266	0.0000015	0.0171	5	2,859,226	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,304	0.0000015	0.0142	5	2,365,075	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	274,191	0.0000015	0.0146	5	2,439,320	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	140,166	0.0000015	0.0167	5	2,780,912	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,266	0.0000015	0.0171	5	2,859,226	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,681	0.0000015	0.0140	5	2,342,193	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	140,166	0.0000015	0.0167	5	2,780,912	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	55,254	0.0000015	0.0203	5	3,387,599	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,643	0.0000015	0.0167	5	2,783,011	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	99,958	0.0000015	0.0179	5	2,980,875	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	45,908	0.0000015	0.0212	5	3,531,916	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	52,609	0.0000015	0.0205	5	3,424,926	0.0002
13	0.0005	0.019	0.000001	31,975	0.0000015	0.0230	5	3,841,522	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	1,532	0.0000015	0.0563	5	9,392,946	0.0023
15	0.0015	0.019	0.000001	101,162	0.0000015	0.0178	5	2,973,434	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	119,009	0.0000015	0.0172	5	2,875,097	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	101,490	0.0000015	0.0178	5	2,971,423	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	87,759	0.0000015	0.0184	5	3,063,649	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	72,100	0.0000015	0.0192	5	3,195,332	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	61,283	0.0000015	0.0198	5	3,310,769	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	87,759	0.0000015	0.0184	5	3,063,649	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	113,279	0.0000015	0.0174	5	2,904,441	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	41,179	0.0000015	0.0217	5	3,620,919	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	61,283	0.0000015	0.0198	5	3,310,769	0.0002

Tabla 6.12 Cargas en los nudos, K=3.

h3	100.00
h1	35.42
h2	44.94
h4	59.18
h5	47.02
h6	25.90
h7	39.45
h8	34.87
h9	23.59
h10	25.25
h11	27.36
h12	28.24
h13	28.24
h14	16.81
h15	18.28
h16	21.44
h17	11.55
h18	6.29
h19	14.58
h20	15.93
h21	18.69

Tabla 6.13 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=3.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040827

Tabla 6.14 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=4$.

K=4									
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,293	0.0000015	0.0171	5	2,859,099	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,331	0.0000015	0.0142	5	2,365,039	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	274,136	0.0000015	0.0146	5	2,439,413	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	140,111	0.0000015	0.0167	5	2,781,134	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,293	0.0000015	0.0171	5	2,859,099	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,710	0.0000015	0.0140	5	2,342,156	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	140,111	0.0000015	0.0167	5	2,781,134	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	55,280	0.0000015	0.0203	5	3,387,238	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,672	0.0000015	0.0167	5	2,782,895	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	99,903	0.0000015	0.0179	5	2,981,220	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	45,940	0.0000015	0.0212	5	3,531,352	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	52,641	0.0000015	0.0205	5	3,424,456	0.0002
13	0.0005	0.019	0.000001	32,066	0.0000015	0.0230	5	3,838,921	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	1,440	0.0000015	0.0576	5	9,611,133	0.0024
15	0.0015	0.019	0.000001	101,220	0.0000015	0.0178	5	2,973,074	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	119,097	0.0000015	0.0172	5	2,874,661	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	101,343	0.0000015	0.0178	5	2,972,321	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	87,818	0.0000015	0.0184	5	3,063,215	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	72,188	0.0000015	0.0192	5	3,194,488	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	61,136	0.0000015	0.0199	5	3,312,519	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	87,818	0.0000015	0.0184	5	3,063,215	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	113,220	0.0000015	0.0174	5	2,904,752	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	41,032	0.0000015	0.0217	5	3,623,900	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	61,136	0.0000015	0.0199	5	3,312,519	0.0002

Tabla 6.15 Cargas en los nudos, $K=4$.

h3	100.00
h1	35.42
h2	44.94
h4	59.18
h5	47.02
h6	25.90
h7	39.45
h8	34.87
h9	23.59
h10	25.25
h11	27.36
h12	28.24
h13	28.24
h14	16.81
h15	18.28
h16	21.44
h17	11.55
h18	6.29
h19	14.58
h20	15.93
h21	18.69

Tabla 6.16 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=4.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040827

Como se puede apreciar en la iteración K=3 el valor de cada gasto de la tubería y el gasto total prácticamente son iguales a los gastos de la iteración K=4, por lo tanto termina el cálculo de la red a presión sin pérdidas locales.

6.3 Red de tuberías a presión con pérdidas locales.

Al igual que en el cálculo de la red sin considerar las pérdidas locales se utiliza el método de Sánchez-Fuentes para darle solución a la misma red pero tomando en cuenta las pérdidas locales.

Para poder comparar la red con y sin pérdidas locales se considera el mismo sistema de ecuaciones no lineales planteados anteriormente y la misma matriz de coeficientes A. También se usan los mismos gastos iniciales propuestos (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Gastos propuestos en cada tubería

Tubería	Gasto (m3/s)
1	0.0017
2	0.0047
3	0.0047
4	0.0027
5	0.0017
6	0.0047
7	0.0027
8	0.0007
9	0.0017
10	0.0021
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0003
14	0.0003
15	0.0014
16	0.0011
17	0.0023
18	0.0012
19	0.0004
20	0.0017
21	0.0012
22	0.0018
23	0.0014
24	0.0017

Para poder incluir las pérdidas locales en el cálculo de la red se debe sumar el incremento ΔC al coeficiente C, como se había mencionado en el capítulo 4.

Ecuación para determinar el ΔC .

$$\Delta C = \frac{0.08263 K}{D^4} \quad (4.19)$$

También necesitamos buscar alguna expresión o valor para el coeficiente de pérdida local “K”. Por lo que se propone considerar algunas de las expresiones descritas en el capítulo 3 de la presente tesis. De acuerdo a la configuración de la red se requieren tres tipos de accesorios: 3 tes (entrada o unión), 4 codos y un cruce (alimentación doble o flujo perpendicular).

Para las tes cuando es una entrada o unión:

$$k = -0.795 \left(\frac{Q_l}{Q}\right)^2 + 1.204 \left(\frac{Q_l}{Q}\right) + 0.083$$

Para los codos:

$$K = 1.49 Re^{-0.145}$$

Para los cruces en el caso de alimentación doble:

$$K_{3\text{ ajust}} = \frac{1.01}{\left(\frac{Re_3}{Re_1} - 0.20\right)^{0.65}} - 0.39$$

$$K_{4\text{ ajust}} = \frac{42.05}{\left(\frac{Re_4}{Re_1} + 1.30\right)^{4.86}} + 0$$

Tabla 6.17 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=0$.

K=0											
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	K	ΔC	C	α
1	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	0.0000	0	2,912,935	0.0001
2	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	0.0000	0	2,379,790	0.0000
3	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	0.0000	0	2,379,790	0.0000
4	0.0027	0.019	0.000001	178,700	0.0000015	0.0159	5	0.0000	0	2,649,420	0.0001
5	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	0.2762	175,125	3,088,060	0.0001
6	0.0047	0.019	0.000001	312,726	0.0000015	0.0143	5	0.0000	0	2,379,790	0.0000
7	0.0027	0.019	0.000001	178,700	0.0000015	0.0159	5	0.2580	163,588	2,813,008	0.0001
8	0.0007	0.019	0.000001	44,675	0.0000015	0.0213	5	0.0000	0	3,553,890	0.0002
9	0.0017	0.019	0.000001	111,688	0.0000015	0.0175	5	0.0000	0	2,912,935	0.0001
10	0.0021	0.019	0.000001	138,493	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,787,666	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	46,909	0.0000015	0.0211	5	0.0000	0	3,514,648	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	53,610	0.0000015	0.0204	5	1.9203	1,217,567	4,628,077	0.0001
13	0.0003	0.019	0.000001	16,753	0.0000015	0.0270	5	0.0000	0	4,506,084	0.0004
14	0.0003	0.019	0.000001	16,753	0.0000015	0.0270	5	0.0000	0	4,506,084	0.0004
15	0.0014	0.019	0.000001	91,584	0.0000015	0.0182	5	0.4811	305,069	3,341,213	0.0001
16	0.0011	0.019	0.000001	74,831	0.0000015	0.0190	5	0.4184	265,304	3,435,085	0.0001
17	0.0023	0.019	0.000001	155,246	0.0000015	0.0163	5	0.5244	332,494	3,056,919	0.0001
18	0.0012	0.019	0.000001	78,181	0.0000015	0.0188	5	0.0000	0	3,140,068	0.0001
19	0.0004	0.019	0.000001	27,922	0.0000015	0.0238	5	0.0000	0	3,968,100	0.0003
20	0.0017	0.019	0.000001	115,038	0.0000015	0.0174	5	0.0000	0	2,895,227	0.0001
21	0.0012	0.019	0.000001	78,181	0.0000015	0.0188	5	0.2909	184,421	3,324,488	0.0001
22	0.0018	0.019	0.000001	122,856	0.0000015	0.0171	5	0.5387	341,539	3,197,950	0.0001
23	0.0014	0.019	0.000001	94,935	0.0000015	0.0181	5	0.0000	0	3,013,263	0.0001
24	0.0017	0.019	0.000001	115,038	0.0000015	0.0174	5	0.2750	174,376	3,069,603	0.0001

Tabla 6.18 Cargas en los nudos obtenidas a partir del primer proceso iterativo, $K=0$.

h3	100.00
h1	36.08
h2	45.39
h4	59.27
h5	47.49
h6	26.21
h7	39.87
h8	34.98
h9	24.03
h10	25.53
h11	28.14
h12	28.77
h13	28.83
h14	17.07
h15	19.47
h16	21.64
h17	12.21
h18	7.07
h19	16.90
h20	17.39
h21	19.57

Tabla 6.19 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, $K=0$.

Conexión	Gasto (m ³ /s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0042
4	0.0022
5	0.0018
6	0.0050
7	0.0022
8	0.0008
9	0.0020
10	0.0016
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0004
14	0.0001
15	0.0014
16	0.0017
17	0.0017
18	0.0012
19	0.0010
20	0.0011
21	0.0012
22	0.0018
23	0.0008
24	0.0011
Total	0.041158

Tabla 6.20 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=1$.

K=1											
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	K	ΔC	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	120,099	0.0000015	0.0172	5	0.0000	0	2,869,724	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	321,137	0.0000015	0.0142	5	0.0000	0	2,368,039	0.0000
3	0.0042	0.019	0.000001	279,252	0.0000015	0.0146	5	0.0000	0	2,430,907	0.0000
4	0.0022	0.019	0.000001	145,227	0.0000015	0.0166	5	0.0000	0	2,761,106	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	120,099	0.0000015	0.0172	5	0.2733	173,291	3,043,015	0.0001
6	0.0050	0.019	0.000001	337,788	0.0000015	0.0141	5	0.0000	0	2,345,898	0.0000
7	0.0022	0.019	0.000001	145,227	0.0000015	0.0166	5	0.2659	168,583	2,929,689	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	53,086	0.0000015	0.0205	5	0.0000	0	3,418,010	0.0002
9	0.0020	0.019	0.000001	136,750	0.0000015	0.0168	5	0.0000	0	2,794,816	0.0001
10	0.0016	0.019	0.000001	105,019	0.0000015	0.0177	5	0.0000	0	2,950,340	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	43,801	0.0000015	0.0214	5	0.0000	0	3,569,965	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	50,503	0.0000015	0.0207	5	2.8139	1,784,177	5,240,675	0.0001
13	0.0004	0.019	0.000001	26,892	0.0000015	0.0240	5	0.0000	0	4,004,322	0.0003
14	0.0001	0.019	0.000001	6,615	0.0000015	0.0348	5	0.0000	0	5,810,928	0.0009
15	0.0014	0.019	0.000001	96,888	0.0000015	0.0180	5	0.5040	319,575	3,319,986	0.0001
16	0.0017	0.019	0.000001	113,139	0.0000015	0.0174	5	0.4205	266,643	3,171,824	0.0001
17	0.0017	0.019	0.000001	111,634	0.0000015	0.0175	5	0.5121	324,685	3,237,908	0.0001
18	0.0012	0.019	0.000001	83,485	0.0000015	0.0186	5	0.0000	0	3,096,319	0.0001
19	0.0010	0.019	0.000001	66,230	0.0000015	0.0195	5	0.0000	0	3,254,868	0.0002
20	0.0011	0.019	0.000001	71,427	0.0000015	0.0192	5	0.0000	0	3,201,830	0.0001
21	0.0012	0.019	0.000001	83,485	0.0000015	0.0186	5	0.2881	182,674	3,278,993	0.0001
22	0.0018	0.019	0.000001	117,553	0.0000015	0.0173	5	0.4571	289,837	3,172,212	0.0001
23	0.0008	0.019	0.000001	51,323	0.0000015	0.0206	5	0.0000	0	3,444,000	0.0002
24	0.0011	0.019	0.000001	71,427	0.0000015	0.0192	5	0.2947	186,853	3,388,683	0.0001

Tabla 6.21 Cargas en los nudos, $K=1$.

h3	100.00
h1	35.15
h2	44.76
h4	59.40
h5	47.38
h6	24.97
h7	39.41
h8	34.63
h9	22.62
h10	24.21
h11	27.29
h12	28.11
h13	28.12
h14	15.19
h15	17.37
h16	20.58
h17	9.98
h18	4.47
h19	13.66
h20	14.97
h21	17.86

Tabla 6.22 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=1.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040834

Tabla 6.23 Cálculos del número de Reynolds Re, factor de fricción f, coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, K=2.

K=2											
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	K	ΔC	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,630	0.0000015	0.0171	5	0.0000	0	2,857,490	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,668	0.0000015	0.0142	5	0.0000	0	2,364,580	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	273,925	0.0000015	0.0146	5	0.0000	0	2,439,767	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	139,900	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,781,978	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,630	0.0000015	0.0171	5	0.2725	172,768	3,030,258	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,583	0.0000015	0.0140	5	0.0000	0	2,342,318	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	139,900	0.0000015	0.0167	5	0.2673	169,499	2,951,476	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	55,617	0.0000015	0.0203	5	0.0000	0	3,382,658	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,546	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,783,404	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	99,693	0.0000015	0.0179	5	0.0000	0	2,982,534	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	44,722	0.0000015	0.0213	5	0.0000	0	3,553,035	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	51,423	0.0000015	0.0206	5	2.8238	1,790,435	5,232,919	0.0001
13	0.0005	0.019	0.000001	30,541	0.0000015	0.0233	5	0.0000	0	3,883,671	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	2,965	0.0000015	0.0447	5	0.0000	0	7,454,176	0.0015
15	0.0015	0.019	0.000001	100,339	0.0000015	0.0179	5	0.5061	320,900	3,299,406	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	118,663	0.0000015	0.0172	5	0.4241	268,915	3,145,729	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	102,658	0.0000015	0.0178	5	0.5025	318,601	3,282,944	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	86,937	0.0000015	0.0184	5	0.0000	0	3,069,769	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	71,754	0.0000015	0.0192	5	0.0000	0	3,198,655	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	62,450	0.0000015	0.0198	5	0.0000	0	3,297,047	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	86,937	0.0000015	0.0184	5	0.2864	181,604	3,251,373	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	114,101	0.0000015	0.0174	5	0.4203	266,516	3,166,629	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	42,346	0.0000015	0.0216	5	0.0000	0	3,597,708	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	62,450	0.0000015	0.0198	5	0.3005	190,527	3,487,574	0.0002

Tabla 6.24 Cargas en los nudos, K=2.

h3	100.00
h1	35.13
h2	44.74
h4	59.40
h5	47.38
h6	24.94
h7	39.39
h8	34.62
h9	22.59
h10	24.18
h11	27.27
h12	28.11
h13	28.10
h14	15.14
h15	17.28
h16	20.56
h17	9.93
h18	4.41
h19	13.53
h20	14.89
h21	17.81

Tabla 6.25 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=2.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040793

Tabla 6.26 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, $K=3$.

K=3											
Tubería	Gasto (m ³ /s)	Diametro (m)	v (m/s)	Re	e (m)	f	L (m)	K	ΔC	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,904	0.0000015	0.0171	5	0.0000	0	2,856,185	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,942	0.0000015	0.0142	5	0.0000	0	2,364,208	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	273,351	0.0000015	0.0146	5	0.0000	0	2,440,735	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	139,326	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,784,289	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,904	0.0000015	0.0171	5	0.2724	172,712	3,028,897	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,883	0.0000015	0.0140	5	0.0000	0	2,341,936	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	139,326	0.0000015	0.0167	5	0.2675	169,600	2,953,888	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	55,891	0.0000015	0.0203	5	0.0000	0	3,378,957	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,845	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,782,198	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	99,119	0.0000015	0.0179	5	0.0000	0	2,986,138	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	44,815	0.0000015	0.0213	5	0.0000	0	3,551,359	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	51,516	0.0000015	0.0206	5	2.8254	1,791,445	5,232,538	0.0001
13	0.0005	0.019	0.000001	31,112	0.0000015	0.0232	5	0.0000	0	3,866,579	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	2,395	0.0000015	0.0480	5	0.0000	0	8,009,987	0.0017
15	0.0015	0.019	0.000001	100,706	0.0000015	0.0178	5	0.5063	321,044	3,297,281	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	119,441	0.0000015	0.0172	5	0.4248	269,314	3,142,272	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	101,513	0.0000015	0.0178	5	0.5007	317,445	3,288,727	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	87,304	0.0000015	0.0184	5	0.0000	0	3,067,030	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	72,532	0.0000015	0.0191	5	0.0000	0	3,191,202	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	61,306	0.0000015	0.0198	5	0.0000	0	3,310,494	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	87,304	0.0000015	0.0184	5	0.2862	181,493	3,248,523	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	113,734	0.0000015	0.0174	5	0.4148	263,026	3,165,063	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	41,202	0.0000015	0.0217	5	0.0000	0	3,620,451	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	61,306	0.0000015	0.0198	5	0.3013	191,039	3,501,533	0.0002

Tabla 6.27 Cargas en los nudos, $K=3$.

h3	100.00
h1	35.13
h2	44.74
h4	59.40
h5	47.38
h6	24.94
h7	39.39
h8	34.62
h9	22.59
h10	24.18
h11	27.27
h12	28.10
h13	28.09
h14	15.14
h15	17.27
h16	20.56
h17	9.93
h18	4.41
h19	13.52
h20	14.88
h21	17.80

Tabla 6.28 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=3.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040789

Tabla 6.29 Cálculos del número de Reynolds Re , factor de fricción f , coeficiente C y coeficiente α para cada tubería, K=4.

K=4											
Tubería	Gasto (m3/s)	Diametro (m)	v (m2/s)	Re	e (m)	f	L (m)	K	ΔC	C	α
1	0.0018	0.019	0.000001	122,930	0.0000015	0.0171	5	0.0000	0	2,856,060	0.0001
2	0.0048	0.019	0.000001	323,968	0.0000015	0.0142	5	0.0000	0	2,364,172	0.0000
3	0.0041	0.019	0.000001	273,296	0.0000015	0.0146	5	0.0000	0	2,440,829	0.0001
4	0.0021	0.019	0.000001	139,271	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,784,513	0.0001
5	0.0018	0.019	0.000001	122,930	0.0000015	0.0171	5	0.2724	172,707	3,028,766	0.0001
6	0.0051	0.019	0.000001	340,913	0.0000015	0.0140	5	0.0000	0	2,341,899	0.0000
7	0.0021	0.019	0.000001	139,271	0.0000015	0.0167	5	0.2675	169,609	2,954,123	0.0001
8	0.0008	0.019	0.000001	55,918	0.0000015	0.0203	5	0.0000	0	3,378,603	0.0002
9	0.0021	0.019	0.000001	139,875	0.0000015	0.0167	5	0.0000	0	2,782,080	0.0001
10	0.0015	0.019	0.000001	99,063	0.0000015	0.0179	5	0.0000	0	2,986,488	0.0001
11	0.0007	0.019	0.000001	44,815	0.0000015	0.0213	5	0.0000	0	3,551,349	0.0002
12	0.0008	0.019	0.000001	51,517	0.0000015	0.0206	5	2.8263	1,792,020	5,233,105	0.0001
13	0.0005	0.019	0.000001	31,169	0.0000015	0.0232	5	0.0000	0	3,864,878	0.0003
14	0.0000	0.019	0.000001	2,337	0.0000015	0.0484	5	0.0000	0	8,077,182	0.0018
15	0.0015	0.019	0.000001	100,733	0.0000015	0.0178	5	0.5064	321,067	3,297,138	0.0001
16	0.0018	0.019	0.000001	119,527	0.0000015	0.0172	5	0.4248	269,352	3,141,885	0.0001
17	0.0015	0.019	0.000001	101,400	0.0000015	0.0178	5	0.5005	317,325	3,289,299	0.0001
18	0.0013	0.019	0.000001	87,331	0.0000015	0.0184	5	0.0000	0	3,066,830	0.0001
19	0.0011	0.019	0.000001	72,619	0.0000015	0.0191	5	0.0000	0	3,190,381	0.0001
20	0.0009	0.019	0.000001	61,192	0.0000015	0.0199	5	0.0000	0	3,311,842	0.0002
21	0.0013	0.019	0.000001	87,331	0.0000015	0.0184	5	0.2862	181,485	3,248,315	0.0001
22	0.0017	0.019	0.000001	113,707	0.0000015	0.0174	5	0.4143	262,663	3,164,842	0.0001
23	0.0006	0.019	0.000001	41,089	0.0000015	0.0217	5	0.0000	0	3,622,746	0.0002
24	0.0009	0.019	0.000001	61,192	0.0000015	0.0199	5	0.3014	191,090	3,502,932	0.0002

Tabla 6.30 Cargas en los nudos, K=4.

h3	100.00
h1	35.13
h2	44.74
h4	59.40
h5	47.38
h6	24.94
h7	39.39
h8	34.62
h9	22.59
h10	24.18
h11	27.27
h12	28.10
h13	28.09
h14	15.14
h15	17.27
h16	20.57
h17	9.93
h18	4.41
h19	13.52
h20	14.88
h21	17.80

Tabla 6.31 Gastos calculados a partir de las cargas en cada nudo, K=4.

Conexión	Gasto (m3/s)
1	0.0018
2	0.0048
3	0.0041
4	0.0021
5	0.0018
6	0.0051
7	0.0021
8	0.0008
9	0.0021
10	0.0015
11	0.0007
12	0.0008
13	0.0005
14	0.0000
15	0.0015
16	0.0018
17	0.0015
18	0.0013
19	0.0011
20	0.0009
21	0.0013
22	0.0017
23	0.0006
24	0.0009
Total	0.040789

En la iteración K=3 el valor de cada gasto de la tubería y el gasto total prácticamente son iguales a los gastos de la iteración K=4, por lo tanto termina el cálculo de la red a presión con pérdidas locales.

6.4 Comparativa de una red con y sin pérdidas locales.

Una vez que ya se resolvió la red de la figura 6.1, en un caso sin pérdidas locales y en el otro caso con dichas pérdidas, y se obtuvieron las cargas en cada nudo podemos obtener la diferencia de carga en cada tubería de la red. Por lo cual se presentan los diagramas de la red con las diferencias de cargas en cada tubería:

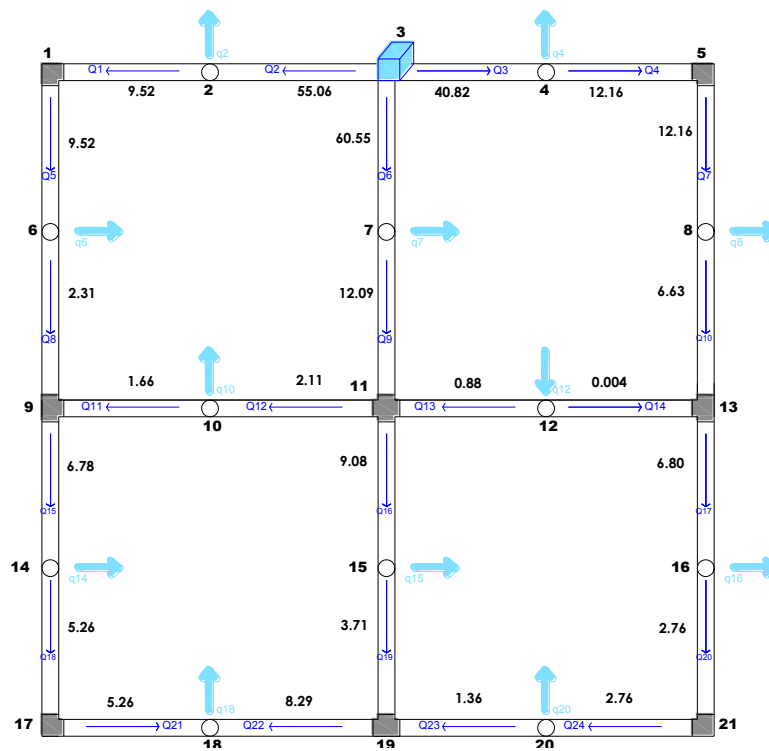


Figura 6.32 Diagrama de la red sin pérdidas locales, diferencias de cargas.

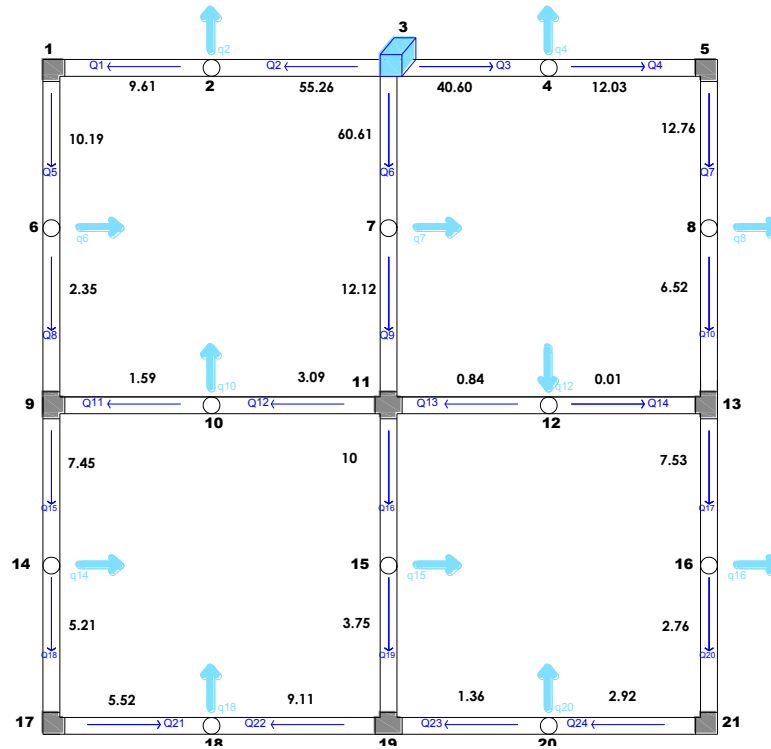


Figura 6.33 Diagrama de la red con pérdidas locales, diferencias de cargas.

Ahora bien, con estos datos se obtiene la diferencia entre las cargas de la red con pérdidas locales y las cargas de la red sin pérdidas locales:

TUBERÍA	(1) DIFERENCIAS DE CARGAS SIN PÉRDIDAS LOCALES (m)	(2) DIFERENCIAS DE CARGAS CON PÉRDIDAS LOCALES (m)	DIFERENCIA EN METROS ENTRE (1) Y (2)	
1	h2-h1	9.52	9.61	0.09
2	h3-h2	55.06	55.26	0.20
3	h3-h4	40.82	40.60	-0.23
4	h4-h5	12.16	12.03	-0.13
5	h1-h6	9.52	10.19	0.67
6	h3-h7	60.55	60.61	0.07
7	h5-h8	12.16	12.76	0.60
8	h6-h9	2.31	2.35	0.05
9	h7-h11	12.09	12.12	0.03
10	h8-h13	6.63	6.53	-0.10
11	h10-h9	1.66	1.59	-0.07
12	h11-h10	2.11	3.09	0.98
13	h12-h11	0.88	0.84	-0.04
14	h12-h13	0.00	0.01	0.01
15	h9-h14	6.78	7.45	0.67
16	h11-h15	9.08	10.00	0.92
17	h13-h16	6.80	7.53	0.73
18	h14-h17	5.26	5.21	-0.05
19	h15-h19	3.71	3.75	0.04
20	h16-h21	2.76	2.76	0.01
21	h17-h18	5.26	5.52	0.26
22	h19-h18	8.29	9.11	0.82
23	h20-h19	1.36	1.36	0.00
24	h21-h20	2.76	2.92	0.16

Es importante señalar que en las tuberías 5 y 7 hay una diferencia de 0.67m y 0.60m respectivamente, como se aprecia en el diagrama estas tuberías se localizan a la salida de codos. Por otro lado en las tuberías 15, 17 y 22 se obtuvo diferencias de 0.67m, 0.73m y 0.82m respectivamente, cada una de estas tuberías se localizan a la salida de una te. Mientras que en las tuberías 12 y 16 existe una diferencia de 0.98m y 0.92m respectivamente, estas se encuentran en las dos salidas del cruce (tipo alimentación doble), cabe mencionar que en este tipo de accesorio juntamente con las tes se registra una diferencia entre no considerar y si las pérdidas locales, en algunos casos casi es de 1m.

Para efectos de comparación se modelo la red de tuberías con pérdidas locales en la paquetería de Epanet. A continuación se muestra una serie de tablas con los resultados obtenidos.

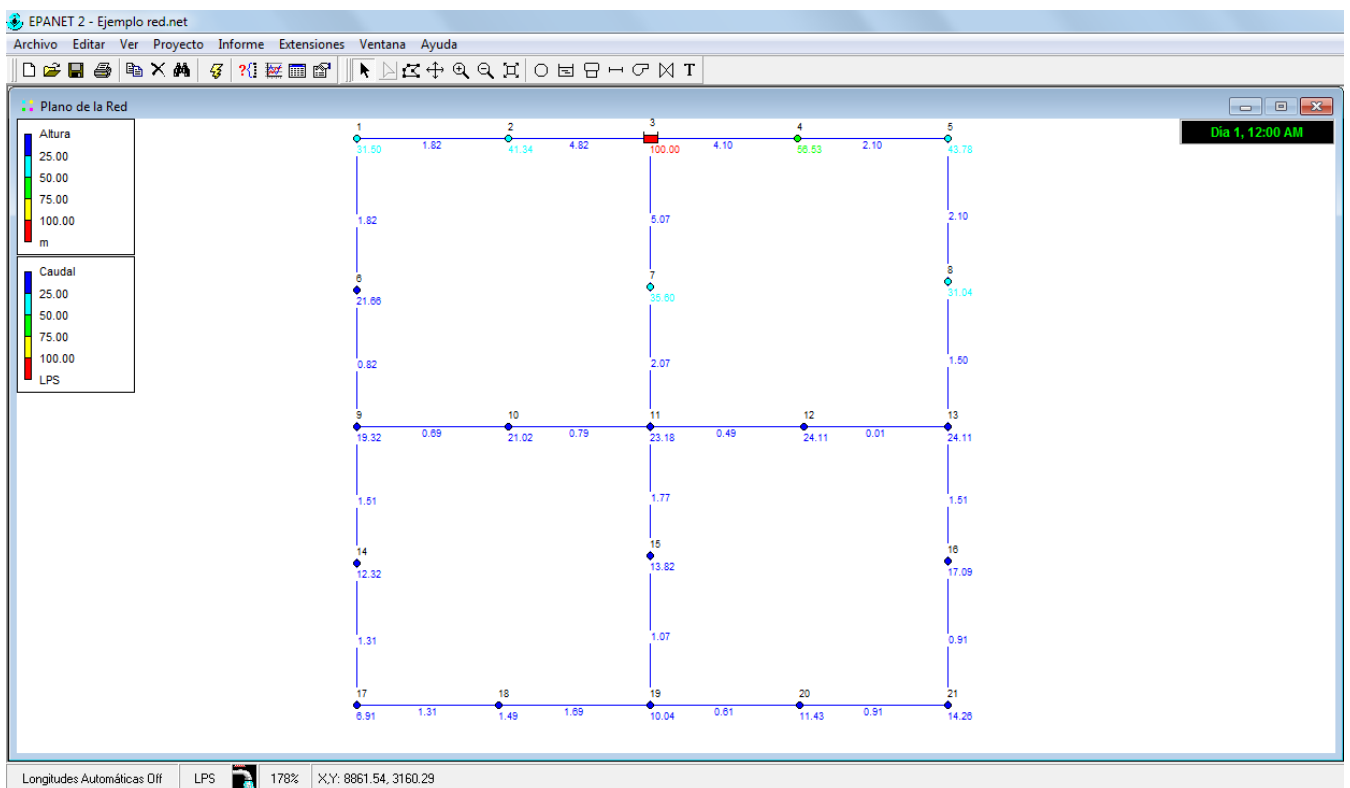


Figura 6.34 Modelación en Epanet de la red de tuberías.

Tabla 6.32 Propiedades de los nudos de la red.

Network Table - Nodes			
	Demand	Head	Pressure
Node ID	LPS	m	m
Junc 1	0	31.5	31.5
Junc 2	3	41.34	41.34
Junc 4	2	56.53	56.53
Junc 5	0	43.78	43.78
Junc 6	1	21.66	21.66
Junc 7	3	35.6	35.6
Junc 8	0.6	31.04	31.04
Junc 9	0	19.32	19.32
Junc 10	0.1	21.02	21.02
Junc 11	0	23.18	23.18
Junc 12	-0.5	24.11	24.11
Junc 13	0	24.11	24.11
Junc 14	0.2	12.32	12.32
Junc 15	0.7	13.82	13.82
Junc 16	0.6	17.09	17.09
Junc 17	0	6.91	6.91
Junc 18	3	1.49	1.49
Junc 19	0	10.04	10.04
Junc 20	0.3	11.43	11.43
Junc 21	0	14.26	14.26
Resvr 3	-14	100	0

Tabla 6.33 Propiedades de cada tubería de la red.

Network Table - Links			
	Flow	Velocity	Unit Headloss
Link ID	LPS	m/s	m/km
Pipe 1	1.82	6.43	1967.59
Pipe 2	4.82	17.01	11731.84
Pipe 3	4.1	14.47	8693.37
Pipe 4	2.1	7.42	2549.78
Pipe 5	1.82	6.43	1967.59
Pipe 6	5.07	17.89	12880.59
Pipe 7	2.1	7.42	2549.78
Pipe 8	0.82	2.91	469.63
Pipe 9	2.07	7.31	2483.06
Pipe 10	1.5	5.3	1385.47
Pipe 11	0.69	2.42	339.88
Pipe 12	0.79	2.78	433.11
Pipe 13	0.49	1.72	185.6
Pipe 14	0.01	0.04	0.33
Pipe 15	1.51	5.33	1399.35
Pipe 16	1.77	6.26	1871.53
Pipe 17	1.51	5.34	1403.66
Pipe 18	1.31	4.63	1082.68
Pipe 19	1.07	3.79	755.87
Pipe 20	0.91	3.22	565.54
Pipe 21	1.31	4.63	1082.68
Pipe 22	1.69	5.96	1710.29
Pipe 23	0.61	2.17	277.94
Pipe 24	0.91	3.22	565.54

En la tabla de abajo se hace una comparativa entre los resultados obtenidos con el método de Sánchez-Fuentes y los de Epanet. Como se puede apreciar con la paquetería de Epanet hay cargas que se exceden, por ejemplo en la tubería 2, 3 y 6 donde la diferencia entre los valores con el método y este es de 3.40m, 2.87m y 3.79m respectivamente, con ello refleja una sobrepresión en la red.

TUBERÍA	(1) DIFERENCIAS DE CARGAS MÉTODO SÁNCHEZ-FUENTES (m)		(2) DIFERENCIAS DE CARGAS EPANET (m)		DIFERENCIA EN METROS ENTRE (1) Y (2)
1	h2-h1	9.61	h2-h1	9.84	0.23
2	h3-h2	55.26	h3-h2	58.66	3.40
3	h3-h4	40.60	h3-h4	43.47	2.87
4	h4-h5	12.03	h4-h5	12.75	0.72
5	h1-h6	10.19	h1-h6	9.84	-0.35
6	h3-h7	60.61	h3-h7	64.40	3.79
7	h5-h8	12.76	h5-h8	12.75	-0.01
8	h6-h9	2.35	h6-h9	2.35	0.00
9	h7-h11	12.12	h7-h11	12.42	0.29
10	h8-h13	6.53	h8-h13	6.93	0.40
11	h10-h9	1.59	h10-h9	1.70	0.11
12	h11-h10	3.09	h11-h10	2.17	-0.93
13	h12-h11	0.84	h12-h11	0.93	0.09
14	h12-h13	0.01	h12-h13	0.00	-0.01
15	h9-h14	7.45	h9-h14	7.00	-0.45
16	h11-h15	10.00	h11-h15	9.36	-0.64
17	h13-h16	7.53	h13-h16	7.02	-0.51
18	h14-h17	5.21	h14-h17	5.41	0.20
19	h15-h19	3.75	h15-h19	3.78	0.03
20	h16-h21	2.76	h16-h21	2.83	0.07
21	h17-h18	5.52	h17-h18	5.41	-0.10
22	h19-h18	9.11	h19-h18	8.55	-0.56
23	h20-h19	1.36	h20-h19	1.39	0.03
24	h21-h20	2.92	h21-h20	2.83	-0.09

7. Conclusiones.

En algunos casos es importante incluir la cuantificación de las pérdidas locales dentro del cálculo en redes de agua potable; ejemplo de ello es en las redes donde la longitud es corta y si cuenta con una gran cantidad de accesorios.

En los sistemas de abastecimiento de las ciudades, durante su funcionamiento están sujetos a variaciones considerables de niveles de carga; es relevante tomar en cuenta dichas pérdidas sobre todo cuando los tanques tienen niveles bajos.

De acuerdo a lo expuesto en esta tesis, los gastos y cargas hidráulicas en una red de tuberías, puede determinarse por medio del método de cálculo hidráulico como es el del Instituto de Ingeniería (Sánchez-Fuentes), el cual tiene la ventaja de no requerir un gran número de iteraciones para alcanzar la solución. Los gastos iniciales que se proponen en cada tubería pueden ser asignados arbitrariamente, incluso iguales entre sí. Por lo que se usó dicho método en este trabajo, obteniendo buenos resultados que permiten ejemplificar la importancia de considerar las pérdidas locales.

La red a presión con y sin pérdidas locales resuelta en el presente trabajo permitió corroborar la importancia de cuantificar dichas pérdidas. En el caso de la red propuesta, el total de accesorios considerados es de 8: 4 codos de 3/4", 3 tes (entrada o unión) de 3/4" y 1 cruce (alimentación doble) de 3/4".

En las tuberías que se encontraban a la salida de cada uno de los accesorios mencionados anteriormente, se registraron pérdidas mayores de carga en comparación a la red sin pérdidas locales. En las tuberías 5 y 7 conectadas a un codo cada una diferencia de más de medio metro, por otro lado en las tuberías 15, 17 y 22 conectadas a la salida de las tres tes en promedio se registró una diferencia de 0.74m y por último en las tuberías 12 y 16 conectadas a las dos salidas del cruce se registró una diferencia de casi un metro. La diferencia de carga considerando la pérdida por accesorios, en total fue de 5.39m.

Al modelar la misma red con la paquetería de Epanet se debe mantener fijo el valor de los coeficientes de pérdidas locales, o cambiarlos manualmente cuando las condiciones de funcionamiento son modificadas, esto implica una desventaja en comparación con el método de Sánchez-Fuentes, el cual calcula los coeficientes de pérdidas de manera

automática para cada situación. El uso de paqueterías como Epanet es muy utilizada, sin embargo es recomendable apoyarse de un método como lo puede ser el de Sánchez-Fuentes, y así obtener mejores resultados.

Para finalizar, una futura línea de investigación podría ser experimentar con tuberías de diámetros mayores, para así obtener expresiones para las pérdidas locales originadas por cruces y tes. También usar diferentes materiales para las tuberías y accesorios, por ejemplo el polietileno de alta densidad, aunque en general las pérdidas locales son consecuencia de la turbulencia, también sería interesante considerar otros accesorios comunes en las redes de agua potable.

8. Bibliografía.

Basurto, H.I. (2014). Tesis: "Pérdidas de energía en cruces de tuberías", México, Universidad Nacional Autónoma de México.

CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Redes de Distribución, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Franco, H. L. E. (2006). Tesis: "Cálculo de Redes de Agua Potable Considerando Flujo Permanente", México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Fuentes, M.O.A. y Rosales, P.I.L. (2004) "Estimación de pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable", En: Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIX, Núm. 1, pp. 65-73, México.

Fuentes M.O.A y Sánchez B. (1991), "Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente", Revista Ingeniería, Vol. LXI, No.4, México.

Hurtado, R.A. (2013). Tesis: "Algunos Aspectos sobre la importancia de considerar las pérdidas locales en el cálculo de redes de agua potable", México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Jiménez, M.M.R. (2004). Tesis: "Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético", México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mataix, C. (1998). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Shaki, México.

Patiño, M. J. A. (2011). Tesis: "Pérdidas menores de energía en redes de tubería de agua potable", México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Saldarriaga, J. (2007), *Hidráulica de tuberías Abastecimiento de agua, redes, riegos*, Alfaomega, Colombia.

Simon, L.A. (1983), *Hidráulica Básica*, Limusa, México.

Sotelo, A.G. (1991). Hidráulica General, Limusa-Noriega Editores, México.

White, F.M. (2007). *Mecánica de Fluidos*, McGraw-Hill, México.