



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

“PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CRUCES DE TUBERÍAS”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

IRAIS BASURTO HERNÁNDEZ

TUTOR

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

MÉXICO, D. F. AGOSTO 2014

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	8
1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN	10
1.1 COMPONENTES DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN	10
1.1.1 TUBERÍAS	10
1.1.2 PIEZAS ESPECIALES	12
1.1.3 VÁLVULAS	13
1.1.4 TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	17
1.1.5 TOMAS DOMICILIARIAS	18
1.1.6 CAJAS ROMPEDORAS DE PRESIÓN	19
1.2 PRESIONES DISPONIBLES	19
1.3 PRESIONES ADMISIBLES	19
1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS PARA ANÁLISIS HIDRÁULICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	20
1.4.1 MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE REDES	20
1.4.1.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE	20
1.4.1.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN NO PERMANENTE	21
1.4.2 MODELOS DE DISEÑO	21
1.4.3 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN	22
2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA	23
2.1 FÓRMULAS DE PÉRDIDA DE ENERGÍA	23
2.2 FACTOR DE FRICCIÓN	25
2.3 PÉRDIDAS LOCALES	29
2.3.1 PÉRDIDA POR ENTRADA	31
2.3.2 PÉRDIDA POR SALIDA	33
2.3.3 PÉRDIDA POR AMPLIACIÓN	34
2.3.4 PÉRDIDA POR CONTRACCIÓN	37
2.3.5 PÉRDIDA POR CAMBIO DE DIRECCIÓN	39
2.3.6 PÉRDIDA POR VÁLVULAS	42
2.3.7 PÉRDIDA POR BIFURCACIÓN	43
2.3.8 PÉRDIDA EN CRUCES DE TUBERÍAS	45
2.3.8.1 ESTADO DEL ARTE	46
3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	49

3.1	CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO	49
3.2	MEDICIONES.....	54
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
4.1	NOMENCLATURA.....	56
4.2	DEDUCCIÓN DE LAS EXPRESIONES Y ANÁLISIS DE K_i	57
4.2.1	FLUJO DIVIDIDO.....	57
4.2.2	FLUJO PERPENDICULAR.....	68
4.2.3	FLUJO ENCONTRADO.....	78
	CONCLUSIONES	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Figura 1.1 Piezas especiales de hierro fundido con extremos bridados.....	9
Figura 1.2 Válvula de compuerta.....	11
Figura 1.3 Válvula de mariposa.....	11
Figura 1.4 Válvulas de admisión y expulsión de aire.....	12
Figura 1.5 Válvula de globo.....	12
Figura 1.6 Válvula de retención.....	13
Figura 1.7 Válvula reguladora de presión.....	13
Figura 1.8 Medidor en una toma domiciliaria.....	14
Figura 1.9 Caja rompedora de presión Valle de Paz.....	15

2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Figura 2.1 Diagrama Universal de Moody.....	23
Figura 2.2. Pérdidas locales producidas por una placa de orificio.....	26
Figura 2.3 Coeficientes de pérdida por entrada.....	27
Figura 2.4 Coeficientes de pérdida (K) en la entrada.....	28
Figura 2.5 Coeficiente de pérdida (K) en entrada en función del radio de curvatura.....	28
Figura 2.6 Esquema de pérdida por salida.....	29
Figura 2.7 Coeficientes de pérdida por salida.....	30
Figura 2.8 Ampliación brusca.....	31
Figura 2.9 Coeficiente de pérdida (K) para expansión brusca.....	31
Figura 2.10 Coeficiente de pérdida (K) para expansión suave.....	32
Figura 2.11 Contracción gradual.....	34
Figura 2.12 Condiciones de flujo en cambios bruscos de diámetro.....	34
Figura 2.13 Coeficiente de pérdida (K) para contracción brusca.....	35
Figura 2.14 Coeficientes de C_c para curvas de diámetro constante y $Re > 2.2 \times 10^5$ en tubos Rugosos	36
Figura 2.15 Coeficientes de pérdida en curvas de diámetro constante con superficie lisa y número de Reynolds de 2.25×10^5	37
Figura 2.16 Coeficientes de pérdida K para cambio de dirección.....	37
Figura 2.17 Coeficiente por cambio de dirección.....	38
Figura 2.18 Coeficiente promedio de pérdida (K) para válvulas parcialmente abiertas, compuerta, disco con eje horizontal o mariposa y globo.....	39
Figura 2.19 Pérdida por bifurcación.....	40
Figura 2.20 Cruce de tuberías en un sistema de distribución de agua.....	41
Figura 2.21 Esquema de un equipo de riego de aspersión con tuberías y accesorios de PVC.....	42
Figura 2.22 Posibles escenarios de flujo en una cruz.....	43

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Figura 3.1 Esquema del modelo experimental.....	47
Figura 3.2 Medidor de flujo y esquema del interior.....	48
Figura 3.3 Sensores de presión.....	49
Figura 3.4 Modulador de presión.....	49

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 4.1 Nomenclatura para los diferentes patrones de flujo.....	52
Figura 4.2 Flujo dividido o de alimentación simple.....	53
Figura 4.3 Gráficas de Re contra K para el cruce de 19mm.....	55
Figura 4.4 Gráficas de Re contra K para el cruce de 25mm.....	56
Figura 4.5 Gráficas de Re contra K para el cruce de 32mm.....	57
Figura 4.6 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 19mm.....	58
Figura 4.7 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm.....	58
Figura 4.8 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 19mm.....	58
Figura 4.9 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 25mm.....	59
Figura 4.10 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 25mm.....	59
Figura 4.11 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 25mm.....	59
Figura 4.12 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 32mm.....	60
Figura 4.13 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 32mm.....	60
Figura 4.14 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 32mm.....	60
Figura 4.15 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 para los cruces de 19,25 y 32 mm.....	63
Figura 4.16 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruces de 19, 25 y 32 mm.....	63
Figura 4.17 Gráficas de Re_4/Re_1 contra K_4 para cruces de 19, 25 y 32 mm.....	64
Figura 4.18 Flujo perpendicular.....	65
Figura 4.19 Gráfica de R3e contra K3 para el cruce de 25 mm.....	67
Figura 4.20 Gráfica de R3e contra K3 para el cruce de 38 mm.....	67
Figura 4.21 Gráfica de Re contra K para el cruce de 13 mm.....	68
Figura 4.22 Gráfica de Re contra K para el cruce de 19 mm.....	68
Figura 4.23 Gráfica de Re contra K para el cruce de 25 mm.....	68
Figura 4.24 Gráfica de Re contra K para el cruce de 32 mm.....	69
Figura 4.25 Gráfica de Re contra K para el cruce de 50 mm.....	69
Figura 4.26 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 13 mm.....	70
Figura 4.27 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19 mm.....	70
Figura 4.28 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25 mm.....	70
Figura 4.29 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32 mm.....	71
Figura 4.30 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50 mm.....	71
Figura 4.31 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruces de 13, 19, 25, 32 y 50 mm.....	72
Figura 4.32 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruces de 13, 19 y 25 mm.....	73
Figura 4.33 Flujo encontrado.....	74
Figura 4.34 Gráficas de Re contra K para el cruce de 13mm.....	76

Figura 4.35 Gráficas de Re contra K para el cruce de 19mm.....	77
Figura 4.36 Gráficas de Re contra K para el cruce de 25mm.....	78
Figura 4.37 Gráficas de Re contra K para el cruce de 32mm.....	79
Figura 4.38 Gráficas de Re contra K para el cruce de 38mm.....	80
Figura 4.39 Gráficas de Re contra K para el cruce de 50mm.....	81
Figura 4.40 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 13mm.....	82
Figura 4.41 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 13mm.....	82
Figura 4.42 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm.....	82
Figura 4.43 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19mm.....	83
Figura 4.44 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25 mm.....	83
Figura 4.45 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32mm.....	84
Figura 4.46 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 38mm.....	84
Figura 4.47 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50mm.....	84
Figura 4.48 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para los cruces de 13 y 19 mm.....	86
Figura 4.49 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para los cruces de 13, 19, 25, 32 y 38 mm.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Tabla 2.1 Coeficiente de pérdida por salida.....	29
Tabla 2.2 Valores del coeficiente K para ampliación gradual.....	32
Tabla 2.3 Valores del coeficiente K para ampliación brusca.....	33
Tabla 2.4 Coeficiente de pérdida por reducción gradual del ángulo θ , según Kisieliev.....	33
Tabla 2.5 Valores típicos de K para válvulas.....	38
Tabla 2.6 Coeficientes de pérdida para bifurcaciones en tuberías (cantos agudos).....	40

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Tabla 3.1 Variación de gastos de entrada y de salida, flujo perpendicular 13 mm.....	51
--	----

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.1 Ecuaciones de ajuste para Flujo dividido.....	61
Tabla 4.2 Ecuaciones de ajuste para K_2 , K_3 y K_4 (Flujo dividido).....	62
Tabla 4.3 Ecuaciones de ajuste para Flujo perpendicular.....	72
Tabla 4.4 Ecuación de ajuste para K_4 (Flujo Perpendicular).....	73
Tabla 4.5 Ecuaciones de ajuste para Flujo Encontrado.....	85
Tabla 4.6 Ecuaciones de ajuste para K_3 y K_4 (Flujo encontrado).....	87

INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia del análisis y la optimización de los sistemas de tuberías que en su estructura contengan diversos accesorios, surge la necesidad de poner especial atención en el estudio de algunos que no cuentan con suficiente información en la literatura. Es por eso que este trabajo realiza el estudio los cruces de tuberías, uno de los accesorios con menos referencias en la literatura.

Este accesorio es ampliamente utilizado en redes de tuberías en diversas industrias, tales como la del petróleo, en la generación de electricidad, gas natural, productos químicos, construcción naval, fabricación de papel y la metalurgia, por mencionar algunas.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de cruces de PVC de diámetros pequeños (13, 19, 25, 32, 38 y 50 mm), lo cuales se analizaron bajo tres diferentes patrones de flujo, esto con la finalidad de caracterizar de mejor manera los posibles escenarios que se pueden desarrollar en una red real. Dichos patrones de flujo son: flujo dividido, en el cual el flujo de agua entra por uno de los ramales del cruce y sale por los 3 restantes; el siguiente tipo de flujo estudiado fue el flujo perpendicular, en el cual el flujo entra por dos ramales adyacentes y sale por los dos restantes; por último, el flujo encontrado, en el cual el flujo entra por dos ramales pero esta vez, por dos ramales opuestos.

Esta tesis consta de cuatro capítulos que ayudan a reportar el trabajo realizado en el laboratorio. El primer capítulo aborda las características generales de una red de distribución, señalando los componentes más importantes de una de estas y su función, así como también menciona algunas de las consideraciones tomadas en la etapa de análisis de una red de distribución.

El segundo capítulo señala los tipos de pérdidas de energía que se debe tomar en cuenta. Estas pérdidas son las ocasionadas por la fricción del fluido con las paredes del tubo (pérdidas por fricción) y las generadas por la presencia de algún accesorio (pérdidas locales). Se describen algunas de las pérdidas locales relevantes y se presenta una recopilación de información acerca de las diferentes formas que se reportan en la literatura para determinar los coeficientes de pérdida correspondientes, así como el estado del arte de las pérdidas por cruces de tuberías

El capítulo tres se refiere al dispositivo utilizado en el laboratorio para realizar las pruebas experimentales para determinar ciertas expresiones para definir los coeficientes de pérdida.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados encontrados después de analizar los datos de presión y flujo tomados en el laboratorio para los diferentes diámetros y patrones de flujo. Se incluyen las relaciones encontradas entre los coeficientes calculados y la relación de Reynolds correspondiente. Las ecuaciones de ajuste sirven para determinar el valor del coeficiente de pérdida según el caso de interés. Dichas ecuaciones presentan un coeficiente de correlación mayor a 0.7, por lo que se consideran adecuadas.

Por último, aparecen las conclusiones y algunas recomendaciones para facilitar futuros trabajos de investigación sobre el tema.

1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Una red de distribución de agua potable (que se denominará en lo sucesivo red) es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde los tanques de servicio o de almacenamiento hasta las tomas domiciliarias o hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial o extinguir incendios.

La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada. Los límites de calidad del agua, para que sea potable se establecen en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 vigente.

1.1 COMPONENTES DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Una red de distribución se compone de tuberías, piezas especiales, válvulas de diversos tipos, hidrantes contra incendio y públicos, tanques de regulación, rebombes y accesorios complementarios que permiten su operación y mantenimiento.

En este subcapítulo se hace una descripción general de cada uno de los componentes de una red, sus tipos así como sus ventajas y desventajas. Aunque se listan las características y datos técnicos más importantes de tuberías y piezas especiales, se recomienda obtenerlos para cada caso directamente del fabricante.

1.1.1 TUBERÍAS

Una tubería se compone de uno o más tubos ensamblados mediante un sistema de unión que permite la conducción de un fluido.

En la selección del material de la tubería intervienen características tales como: resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad de conducción, economía, facilidad de conexión y reparación, y especialmente la conservación de la calidad del agua.

La resistencia mecánica de la tubería le permite soportar cargas externas, como cargas estáticas y dinámicas. Debe soportar cargas internas (presión hidrostática), tanto de operación como transitorios hidráulicos (golpe de ariete), aunque en redes de distribución los transitorios suelen ser pequeños. Influye también en la resistencia a daños durante su instalación.

La resistencia de la tubería debe ser mayor que la máxima carga estática. Ella se calcula restando la cota de la tubería a la cota de la carga estática en dicho punto. En los conductos que se encuentran con desniveles suaves, la carga estática máxima es el mayor valor de los calculados entre sus dos extremos.

La durabilidad es el grado al cual la tubería provee servicio satisfactorio y económico bajo las condiciones de uso. Implica larga vida útil y hermeticidad, tanto en la tubería como en su sistema de unión.

La resistencia a la corrosión está ligada a la durabilidad, pues es la capacidad de resistir suelos y aguas agresivos, los cuales provocan reacciones químicas adversas entre la pared del tubo y su entorno, tanto interno como externo, reduciendo la capacidad de conducción de la tubería, así como la vida útil de la misma. Se deben tomar en cuenta ciertas medidas para asegurar la resistencia a la corrosión de la tubería, las cuales son discutidas más adelante.

La capacidad de conducción depende de la lisura interior de la tubería. En Hidráulica, la facilidad con que el agua circula a través de la tubería se determina por medio de un factor o coeficiente de rugosidad. De esta forma, es posible calcular las pérdidas por fricción. El valor del factor de rugosidad depende del material de la tubería, su edad, las condiciones en que se encuentre y el flujo en su interior. En algunos tipos de tubería se puede conservar en buen estado sus paredes interiores recubriéndolas con cemento, asfalto, o algún otro revestimiento.

El tipo de unión empleado en las tuberías se refiere al sistema de juntas empleado para enlazar las tuberías. Aunque existen gran variedad de juntas, algunos tipos son especialmente prácticos y eficientes dependiendo del material y de los requerimientos de instalación de la tubería. Cabe destacar que las juntas generalmente permiten cierto grado de deflexión (curvatura en el tendido de la tubería), el cual es especificado en los catálogos del fabricante. Las tuberías empleadas actualmente son compatibles con otros tipos de tubería; es decir, el fabricante provee adaptadores y ciertos tipos de juntas para enlazar tuberías de materiales diferentes.

En redes de distribución donde la red se construye tendiendo las diferentes tuberías que la conforman durante la construcción y posteriormente realizando las conexiones a usuarios conforme se requieren, resulta imprescindible la fácil instalación de conexiones tanto domiciliarias como de mayores diámetros con el fin de expandir la red para servir a industrias, unidades habitacionales, comercios, etc. Resulta importante que la tubería sea reparable o al menos fácilmente reemplazable.

Finalmente, la tubería deberá mantener la calidad del agua sin añadir sabores, olores, o sustancias químicas al agua transportada. Adicionalmente, el sistema de unión y la tubería deberán evitar la infiltración de sustancias contaminantes.

En la fabricación de los tubos usan diversos materiales, siendo empleados en las redes de abastecimiento de agua potable los elaborados de: plástico - poli(cloruro de vinilo) (PVC) y polietileno de alta densidad (PEAD) -,fibrocemento (FC) antes denominado asbestocemento (AC), hierro fundido, concreto pre-esforzado, así como acero. Ellos también se llegan manejarse en redes de gran tamaño o en líneas de alimentación.

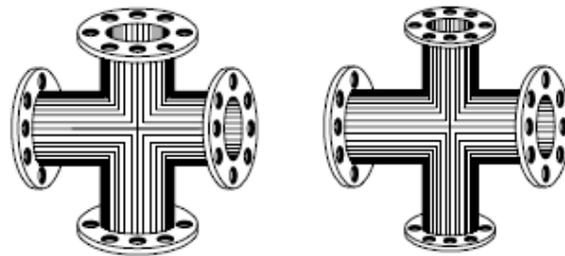
1.1.2 PIEZAS ESPECIALES

Se les llama piezas especiales a todos aquellos accesorios de la tubería para formar cambios de dirección, ramificaciones e intersecciones, así como conexiones incluso entre tuberías de diferentes materiales y diámetros. También se emplean en la inserción de válvulas y la conexión con estaciones de bombeo y otras instalaciones.

En general, se dispone de piezas especiales fabricadas de: hierro fundido (con bridas, extremos lisos, campana-espiga), fibrocemento, PVC, polietileno, concreto pre-esforzado y acero. También se dispone de accesorios complementarios empleados para formar uniones como: juntas mecánicas (Gibault, universal, etc.), empaques y tornillos de acero con cabeza y tuerca hexagonal estándar.

Las piezas especiales de hierro fundido (figura 1.1) son las más empleadas y se fabrican para todos los diámetros de las tuberías. Se conectan entre sí o con válvulas mediante bridas con tornillos y un empaque intermedio, y pueden unirse a tuberías de fibrocemento utilizando juntas Gibault.

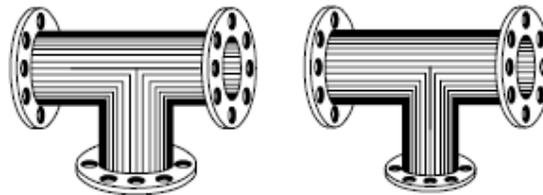
También se fabrican bajo pedido piezas especiales de fibrocemento hasta usualmente 150 mm (6") ya que su resistencia mecánica es baja en diámetros mayores. Los fabricantes de tuberías ofrecen entre sus líneas de productos adaptadores para tuberías de otros materiales, otros sistemas de unión o incluso tubos lisos que pueden ser unidos mediante juntas mecánicas.



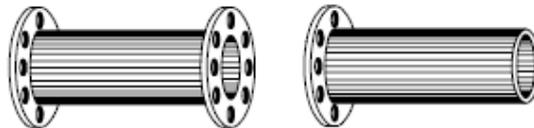
CRUCES



CODOS



TES



CARRETE

EXTREMIDAD

Figura 1.1 Piezas especiales de hierro fundido con extremos bridados (MAPAS, 2007)

1.1.3 VÁLVULAS

Las válvulas son dispositivos mecánicos que son empleados para detener, iniciar o controlar las características del flujo en conductos a presión. Pueden ser accionadas manualmente o por medios automáticos o semiautomáticos. Así, existen dispositivos eléctricos, hidráulicos o neumáticos, los cuales se usan en plantas de tratamiento o en instalaciones donde se operan frecuentemente las válvulas. En redes de distribución son usuales las válvulas manuales con palancas, volantes y engranes, cuando los cierres y aperturas son ocasionales.

Las válvulas permiten el aislamiento de ciertos tramos de tubería para realizar labores de reparación o mantenimiento, o simplemente evitar el flujo o cambiarlo de dirección. También se usan para drenar o vaciar una línea, controlar el gasto, regular los niveles en los tanques de almacenamiento, evitar o disminuir los efectos del golpe de ariete (cambios de presión que pueden colapsar la tubería), la salida o entrada de aire, así como evitar contraflujos; es decir, prevenir el flujo en dirección contraria.

Las válvulas se dividen en dos clases según su función: 1) Aislamiento o seccionamiento y 2) Control. Según su tipo las válvulas de aislamiento pueden ser: de compuerta, de mariposa, o de asiento (cilíndrica, cónica o esférica). Las válvulas de asiento pueden realizar ambas funciones. A su vez, las válvulas de control pueden ser: de altitud, de admisión y expulsión de aire, controladoras de presión, de globo, de retención (check), o de vaciado (de desagüe).

Las válvulas modernas poseen un diseño hidrodinámico que disminuye las pérdidas de carga y la cavitación. Tienen como característica un cuerpo básico al cual se le pueden agregar los controles necesarios para cambiar el flujo o la presión. Existen además válvulas de admisión y expulsión de aire que no se corroen y que son ligeras.

En redes de distribución las válvulas de compuerta son las más empleadas para aislar tramos de tubería, ya sea para su revisión o reparación, debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y baja pérdida de carga cuando están completamente abiertas.

En general, dentro de las válvulas utilizadas en redes de distribución se pueden identificar:

- a) Válvulas de compuerta
- b) Válvulas de mariposa
- c) Válvulas de asiento
- d) Válvulas de altitud
- e) Válvulas para admisión y expulsión de aire
- f) Válvulas reguladoras de presión
- g) Válvulas de globo
- h) Válvulas de retención

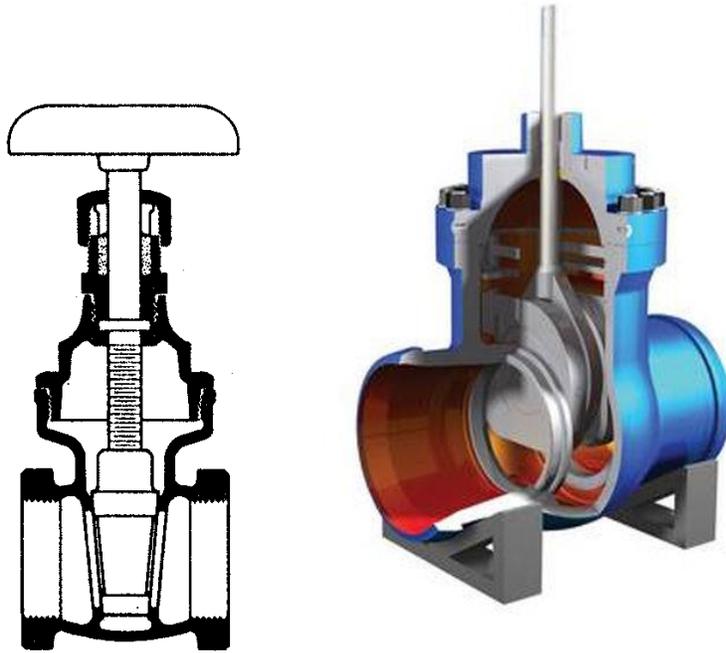


Figura 1.2 Válvula de compuerta



Figura 1.3 Válvula de mariposa

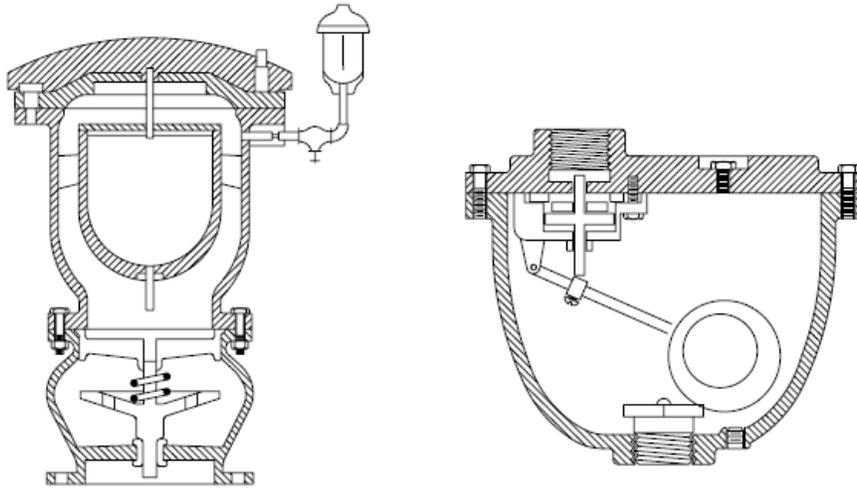


Figura 1.4 Válvulas de admisión y expulsión de aire

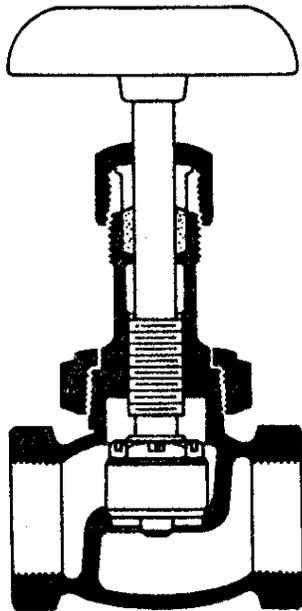


Figura 1.5 Válvula de globo



Figura 1.6 Válvula de retención



Figura 1.7 Válvula reguladora de presión

1.1.4 TANQUES DE DISTRIBUCIÓN

Los almacenamientos o tanques son utilizados en los sistemas de distribución de agua para asegurar la cantidad, la presión del agua disponible en la red y la regulación de los caudales. Según su construcción pueden ser superficiales o elevados. Los superficiales se emplean cuando se dispone de terrenos elevados cerca de la zona de servicio.

Los tanques de distribución poseen un volumen determinado de almacenamiento de agua, el cual se compone de un volumen para regular, otro para almacenar (usado en caso de falla de la fuente o emergencias) y uno adicional para el combate contra incendios. Según la función del tanque a la que se dé mayor importancia, el tanque puede ser de

regulación o de almacenamiento. Lo más común es emplear el tanque para regular (tanque de regulación), minimizando los volúmenes para almacenamiento y combate contra incendios.

En un sistema de distribución conviene ubicar el almacenamiento en el centro de la zona de servicio para tener diámetros económicos en las tuberías de la red y mantener uniformidad en las presiones disponibles.

Los tanques de regulación permiten:

1. Regular las presiones en la red y así reducir las fluctuaciones de presión debidas a las variaciones de la demanda. Esto provee un mejor servicio a los consumidores y la presión necesaria para combatir incendios.
2. Elevar la presión en puntos lejanos de los tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo, y mejorar el servicio durante períodos de demanda pico.
3. Regular la carga de las bombas. Cuando se colocan tanques de regulación cerca de las estaciones de bombeo, las cargas de bombeo son más uniformes. Esto influye en una mejor selección, operación y eficiencia de las bombas.

1.1.5 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. Es la parte de la red que demuestra la eficiencia y calidad del sistema de distribución pues es la que abastece de agua directamente al consumidor.



Figura 1.8 Medidor en una toma domiciliaria

1.1.6 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, reduciendo de esta forma la presión hidrostática estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo.

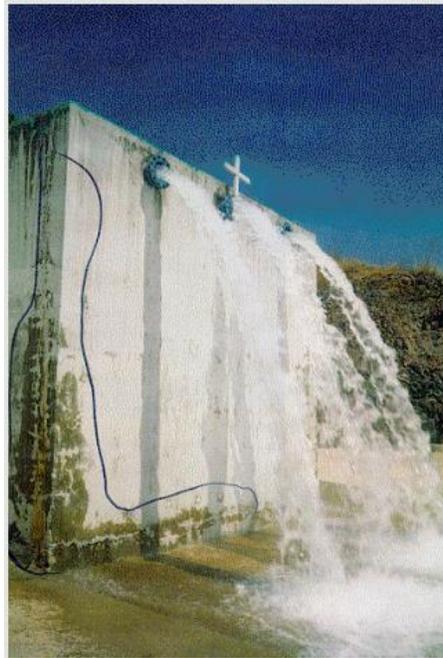


Figura 1.9 Caja rompedora de presión Valle de Paz

1.2 PRESIONES DISPONIBLES

La presión o carga hidráulica que actúa en un punto de una tubería se define por la diferencia entre la cota piezométrica en este punto y la cota del centro de la tubería. En redes de distribución es común manejar las presiones con relación al nivel de la calle en vez de referirlas al centro del tubo. En este caso se les llama presiones disponibles o libres y se calculan para los cruces de las tuberías.

1.3 PRESIONES ADMISIBLES

El régimen de presiones en una red depende de dos factores: la necesidad del servicio y las condiciones topográficas de la localidad. Las necesidades del servicio obligan por una parte a seleccionar una presión mínima capaz de atender dos clases de requerimientos: los de las edificaciones y la demanda contra incendio.

Por otro lado, presiones muy altas en la red requerirán de tuberías y accesorios más resistentes (más costosos) e incrementarán las fugas. Por lo tanto, en ningún punto de la red la presión debe exceder una presión máxima permisible. La presión mínima debe verificarse en la red de distribución de tal manera que en todos los puntos se tenga una presión por lo menos igual a ésta en la hora de máxima demanda y, se garantice un suministro mínimo. En cambio, la máxima se presentará cuando exista poca demanda y la red continúe funcionando a presión. El establecimiento de estas condiciones en una localidad se combina con su topografía.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS PARA ANÁLISIS HIDRÁULICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN.

En la práctica se utilizan diferentes tipos de modelos de una red de distribución, que conforman una visión simplificada del sistema dependiendo del cometido para el que se utilicen. En una primera clasificación, se distingue entre modelos de análisis o de diseño, aun cuando la frontera que los separa no está, completamente definida.

Desde un punto de vista elemental y sin afán de generalizar, se dice que un modelo de análisis (o revisión) permite predecir el comportamiento de una red de distribución a partir de la configuración y características del propio sistema (dimensiones e interconexión de los elementos) y de la situación operativa en la que está funcionando (caudales de consumo, presiones de alimentación, etc.), mientras que un modelo de diseño sirve para obtener la configuración y seleccionar los diámetros de sus conductos.

1.4.1 MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE REDES

Siguiendo esta primera clasificación, se tienen los siguientes tipos de modelo:

1.4.1.1 ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE

En este tipo de modelos se considera que el flujo posee un régimen permanente; esto es, se mantiene constante a lo largo del tiempo. En la realidad, el flujo no se desarrolla en régimen permanente en casi ninguna ocasión, pero cuando los cambios en el tiempo son de pequeña magnitud o se desarrollan muy lentamente, la hipótesis resulta apropiada. Este tipo de modelos reflejan la respuesta del sistema ante unas condiciones dadas de funcionamiento.

1.4.1.2 ANÁLISIS EN RÉGIMEN NO PERMANENTE

Los caudales que discurren por una red de distribución no se mantienen constantes en el tiempo, debido tanto a las fluctuaciones de la demanda como a las operaciones de control que se ejercen sobre el sistema. No obstante, se diferencian dos escalas de variabilidad temporal que dan lugar a los siguientes tipos de modelos numéricos:

- Simulación de la operación del sistema.

En este caso se analiza la evolución de las variables del sistema a lo largo de períodos de funcionamiento determinados, que suelen corresponder a situaciones en las que cíclicamente se "repite" el estado del sistema, normalmente de duración diaria. Su interés reside en evaluar las variaciones de presión en los nudos y de nivel en los depósitos. También los cambios en el flujo por el arranque y parado del bombeo, posicionamiento de las válvulas de regulación, etc. La simulación temporal se lleva a cabo considerando la evolución dinámica del sistema, o bien aproximar su comportamiento como una sucesión de estados permanentes, mantenidos cada uno de ellos a lo largo de un intervalo de tiempo de estudio.

- Análisis en régimen transitorio.

Bajo esta denominación se estudian los fenómenos que acontecen como consecuencia de un cambio brusco en la velocidad de circulación del fluido, y cuyas consecuencias pueden ser negativas, afectando incluso a la integridad física de la instalación. Con estos modelos se analizan situaciones transitorias críticas, para establecer los casos en los que pueda aparecer daños para el sistema y estudiar las medidas correctoras pertinentes.

1.4.2 MODELOS DE DISEÑO

El diseño del sistema presenta dos aspectos claramente diferenciados:

- Distribución física y conexionado de los componentes de la red (trazado de la red).
- Dimensionado de los componentes del sistema.

Es habitual encontrar en la bibliografía sobre el tema que el tratamiento del dimensionado de los elementos de una red de distribución, o como suele expresarse, el dimensionado de la red, se efectúa con base en condiciones de funcionamiento de régimen permanente.

Sin embargo, hay que hacer uso de otro tipo de condiciones; por ejemplo, para acometer el dimensionado de elementos de protección contra el golpe de ariete será necesario

plantear condiciones de diseño que incluyan un funcionamiento del sistema en régimen transitorio.

1.4.3 MODELOS DE OPTIMACIÓN DE LA OPERACIÓN

Existe otro tipo de modelos para realizar la operación de una manera eficiente cumpliendo con unos determinados objetivos. En este tipo de modelos se supone que la red de distribución ya ha sido concebida, y por lo tanto, sus entradas son los datos de la propia red y las condiciones de funcionamiento esperados, mientras que las salidas son las estrategias de bombeo y manipulación de las válvulas de la red para conseguir las condiciones de funcionamiento propuestas, con el objetivo principal, de minimizar el costo de operación en el sistema.

2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA

En un sistema de tuberías se pueden distinguir dos tipos de pérdidas de energía o carga: pérdidas de carga por fricción (h_f), que representan la disipación energética que se produce por la circulación del fluido en la conducción, y por otro lado, las pérdidas localizadas o menores, que se desarrollan en discontinuidades localizadas de la conducción, como estrechamientos, derivaciones, válvulas, etc.

El calificativo de "pérdidas menores", en ocasiones no corresponde a la magnitud de este tipo de pérdidas, puesto que ocasionalmente son superiores a las pérdidas de carga por fricción. La pérdida de carga unitaria o pendiente hidráulica S se define como la pérdida de carga por fricción por metro de longitud de la conducción

$$S = h_f/L$$

2.1 FÓRMULAS DE PÉRDIDA DE ENERGÍA

Con el objetivo de determinar la magnitud de las pérdidas de energía, de manera más exacta, han sido propuestas numerosas expresiones que relacionen el gasto con la pérdida de carga en las tuberías a presión. Una de las primeras es la ecuación de Chezy (1775), que establece:

$$v = C\sqrt{SR_h} \quad (2.1)$$

en la cual C es un coeficiente empírico de ajuste, que depende del material de la tubería, de su diámetro y hasta de su velocidad. Si la conducción es de sección circular con diámetro D , la sección de paso del fluido será $A = \pi D^2/4$ y el perímetro mojado $P = \pi D$, de forma que el radio hidráulico resulta $R_h = D/4$. Sustituyendo en (2.1), la fórmula de Chezy toma la forma:

$$v = C\sqrt{SR_h} = C'\sqrt{SD} \rightarrow h_f = \frac{L}{DC'^2} v^2 = \left(\frac{16L}{\pi^2 C'^2 D^5}\right) Q^2 \quad (2.2)$$

De acuerdo con las observaciones experimentales y en campo depende de varios aspectos, que de acuerdo con el Teorema de Buckingham (o Pi) se tiene la función:

$$\varphi(D, \varepsilon, \varepsilon', m, v, \tau, \rho, \nu) = 0 \quad (2.3)$$

donde :

D: Diámetro de la conducción.

ε : Rugosidad de las paredes del tubo.

ε' : Separación promedio de las irregularidades.

m: Factor de forma de las irregularidades (adimensional).

v: Velocidad del fluido.

τ : Tensión tangencial.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

Expresado en función de parámetros adimensionales, la ecuación 2.3 se escribe:

$$\varphi\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{\rho v^2}{\tau}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\varepsilon'}{D}, m\right) = 0 \quad (2.4)$$

Aunque existen medios físicos para la determinación de la rugosidad ε , no ocurre lo mismo con los parámetros ε' y m, y su estimación podría resultar extremadamente compleja, por lo que se eliminan de la formulación, aunque su efecto puede ser incluido en la rugosidad "equivalente" ε . Con estas consideraciones podemos reescribir la ecuación (2.4) como:

$$\frac{\tau}{\rho v^2} = \varphi'\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{\varepsilon}{D}\right) = \varphi'(Re, \varepsilon_r) \quad (2.5)$$

donde Re es el número de Reynolds, y ε_r se denomina rugosidad relativa, ambos adimensionales.

Sustituyendo (2.5) para una conducción de sección circular y diámetro D obtenemos:

$$S = \varphi'(Re, \varepsilon_r) \frac{8 v^2}{D 2g} = f(Re, \varepsilon_r) \frac{1 v^2}{D 2g} \quad (2.6)$$

La expresión anterior es conocida usualmente como ecuación de Darcy-Weisbach, ya que fue inicialmente propuesta por Weisbach en 1855 y posteriormente modificada por Darcy en 1875. Su expresión en términos de la pérdida de carga h_f resulta:

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} = \left(\frac{8 f L}{\pi^2 g D^5}\right) Q^2 \quad (2.7)$$

En la cual el coeficiente f recibe el nombre de factor de fricción.

2.2 FACTOR DE FRICCIÓN

La diferencia principal que aporta la ecuación de Darcy-Weisbach respecto de la de Chezy estriba en la adimensionalidad del factor de fricción f , siendo éste el atractivo principal que ha hecho de la expresión de Darcy-Weisbach posiblemente la más utilizada en la hidráulica aplicada.

Así, en 1911 Blasius propone la siguiente expresión de f para tubería lisa:

$$f = 0.3164 * Re^{-0.25} \quad (2.8)$$

En 1930, Von Karman y Prandtl proponen una expresión implícita de f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.9)$$

En 1933 Nikuradse realiza diversos ensayos sobre tuberías artificialmente dotadas de rugosidad, con valores perfectamente calibrados, cuyo resultado se resume en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} \right] \quad (2.10)$$

la cual es válida para tubos rugosos con flujo en régimen turbulento plenamente desarrollado. Por otro lado, las experiencias de Nikuradse confirman plenamente la fórmula de Poiseuille, válida en régimen laminar ($Re \leq 2000$):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.11)$$

Colebrook presentó en 1938 una fórmula que se ajustaba bastante bien a los valores del factor de fricción f observados experimentalmente para tubos comerciales, en función del número de Reynolds Re y la rugosidad relativa ε_r , obteniendo:

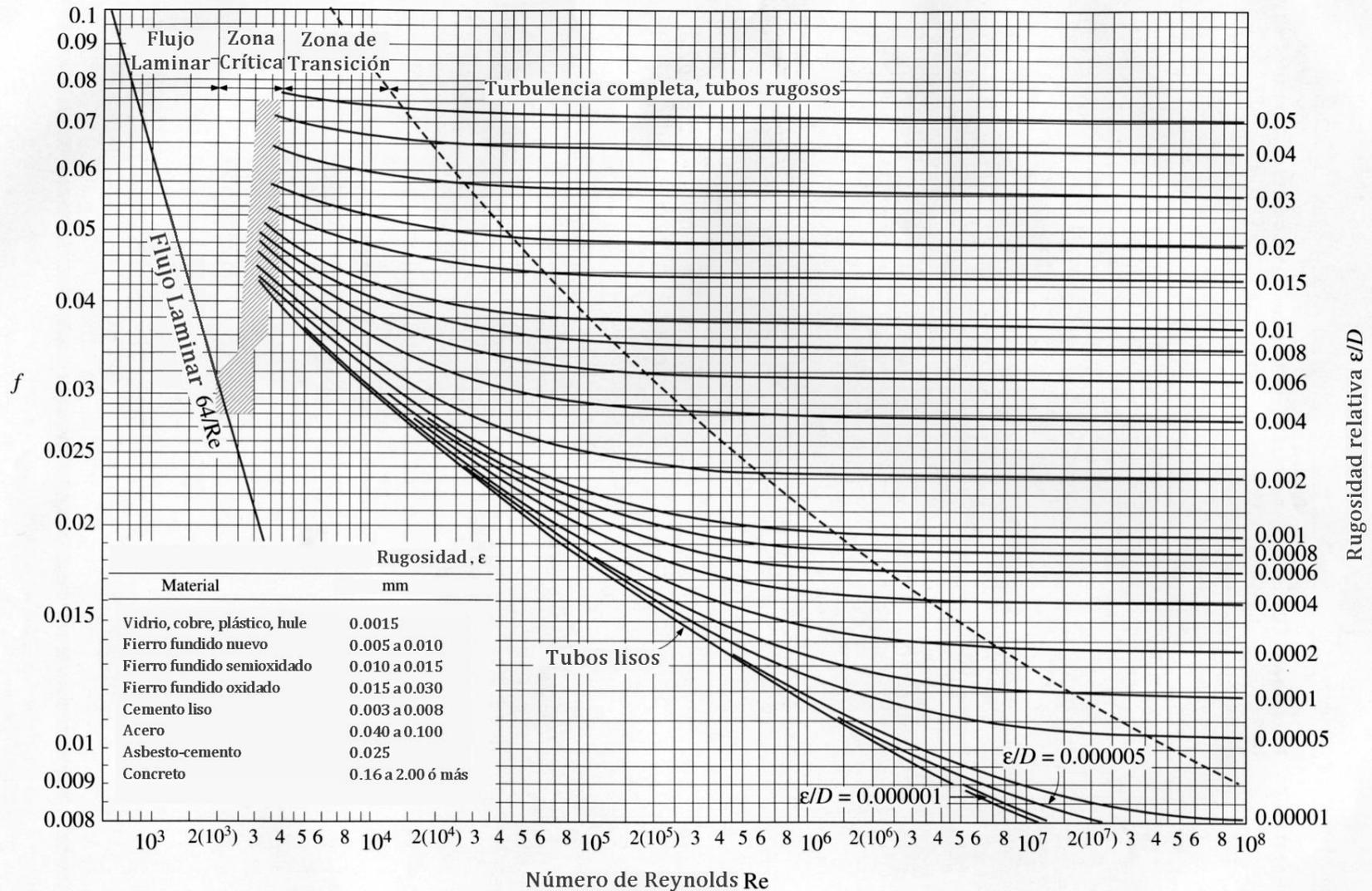
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.12)$$

la cual engloba a las expresiones de Von Karman (2.9) y Nikuradse (2.11) con la única limitación de que el flujo sea en régimen turbulento ($Re \geq 4000$).

En 1944, L.F. Moody tras ensayar con nuevos materiales publicó sus resultados, esta vez en forma gráfica, en un ábaco que se conoce en la bibliografía como el diagrama de Moody, y que muestra la Figura 2.1.

El diagrama de Moody es una gráfica log-log del factor de fricción f frente al número de Reynolds Re , actuando la rugosidad relativa ε_r como parámetro de las diversas curvas. Posee la virtud de que permite determinar el valor del factor de fricción f a partir de los parámetros adimensionales Re y ε_r , sin necesidad de recurrir a procedimientos iterativos, imprescindibles en el caso de utilizar ecuaciones implícitas en f tales como las de Von Karman-Prandtl y Colebrook-White.

La utilización práctica de la ecuación de Colebrook-White (2.12) en su forma más general, puede resultar incómoda al figurar el factor de fricción f en forma implícita, pero es posible despejar f mediante un sencillo cálculo iterativo de punto fijo, cuya convergencia está asegurada para los valores de Re y ε_r habitualmente empleados en redes de distribución.



Número de Reynolds Re
 Figura 2.1 Diagrama Universal de Moody

La última ecuación explícita y, por consiguiente, la más exitosa, apareció en el año de 1976 y fue desarrollada por los investigadores Prabhata K. Swamee y Akalank K. Jain, quienes deseaban obtener una ecuación más sencilla para calcular el factor de fricción f . Para desarrollar su ecuación, los investigadores resolvieron la ecuación de Colebrook-White calculando el factor de fricción para los dos extremos de flujo turbulento: flujo turbulento hidráulicamente liso y flujo turbulento hidráulicamente rugoso con altos números de Reynolds. En ambos casos obtuvieron las siguientes ecuaciones a través de la técnica de ajuste de curvas:

a) Flujo turbulento hidráulicamente rugoso:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{K_s}{3.7d}\right)\right]^2} \quad (2.13)$$

b) Flujo turbulento hidráulicamente liso:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (2.14)$$

Las ecuaciones 2.13 y 2.14 fueron combinadas por Swamee y Jain con el fin de obtener una ecuación explícita para el factor de fricción en la zona de transición de flujo turbulento en tuberías circulares, siguiendo los pasos dados por Colebrook y White. La ecuación que resultó fue:

c) Todo el rango de flujo turbulento

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{K_s}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15 se reduce de la ecuación 2.13 para flujo turbulento hidráulicamente rugoso y la ecuación 2.14 para flujo turbulento hidráulicamente liso. La ecuación 2.15 fue comparada con la ecuación de Colebrook-White con el fin de establecer su exactitud. Se encontró que para los rangos:

$$10^{-6} \leq \frac{K_s}{d} \leq 10^{-2} \quad \text{y} \quad 5 * 10^3 \leq Re \leq 10^8$$

Los errores involucrados en el factor de fricción siempre fueron menores que 1%. Hoy en día, varios de los programas comerciales para el cálculo de redes de distribución de agua potable utilizan la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Swamee-

Jain. Sin embargo, debido a la alta velocidad de las computadoras modernas, no existe ninguna ventaja en utilizar una ecuación explícita para reemplazar la ecuación no explícita de Colebrook-White y algún método iterativo para calcular el factor de fricción. Es preferible mantener las ecuaciones racionales físicamente basadas.

2.3 PÉRDIDAS LOCALES

También referidas por algunos autores como pérdidas singulares, localizadas, secundarias, accidentales o por accesorios, son aquellas pérdidas de energía (h_L) ocasionadas por los elementos que se emplean para darle funcionalidad y geometría a la red: codos, tees, cruces, reducciones, ampliaciones y válvulas, entre muchos otros.

A diferencia de las pérdidas por fricción (h_f), las locales no se presentan a lo largo de los tramos de las tuberías, sino que ocurren en tramos cortos específicos donde están ubicados tales elementos.

Las pérdidas locales se producen, básicamente, por las perturbaciones que los elementos mencionados inducen en el flujo a presión, normalmente desarrollado, y que ocasionan la aparición de turbulencias haciendo que parte de la energía del fluido se disipe en forma de calor. Como ejemplo, en la Figura 2.2 se presenta la pérdida causada por la presencia de una placa de orificio, usada comúnmente para estimar el gasto que fluye por la tubería. Como se puede observar en ella, la turbulencia ocasionada por el elemento va acompañada por un descenso rápido de la carga estática (que se denota como h en la figura), a la vez que se registra un aumento en la carga de velocidad debida a la reducción de la sección de flujo. Alguna longitud aguas abajo (L_3 en la figura) la carga estática se levanta nuevamente, pero no logra alcanzar el nivel con el que entró al accesorio; esta diferencia corresponde a la pérdida local h_L .

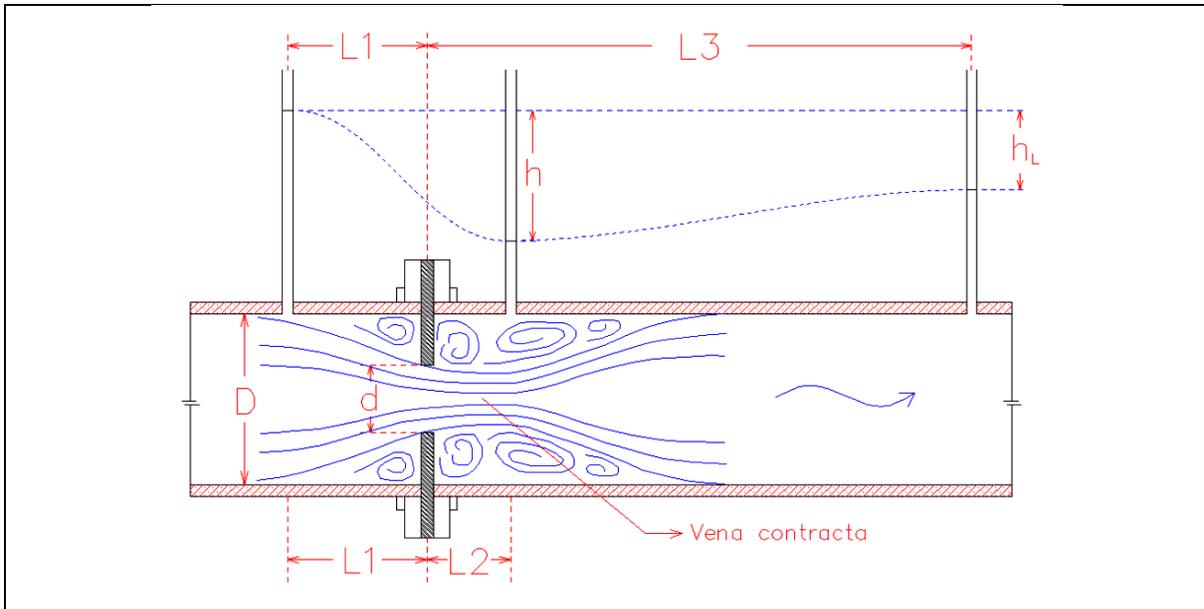


Figura 2.2. Pérdidas locales producidas por una placa de orificio. (Patiño,2011)

Las longitudes L1, L2 y L3, donde suelen ubicarse los piezómetros o cualquier otro dispositivo para medir las presiones del flujo, es común que se expresen en múltiplos del diámetro de la tubería.

Cabe mencionar que, aunque el apelativo de “pérdidas menores” puede llevar a pensar que no son de importancia, hecho que se ha visto reflejado en que muchos diseñadores las omitan en sus proyectos. En las tomas domiciliarias, algunos autores reportan pérdidas por accesorios del orden de unas 2 a 5 veces la magnitud de las pérdidas por fricción, para diámetros entre 13 mm y 19 mm, y gastos entre 0.20 l/s y 0.40 l/s.

A diferencia del caso de las pérdidas por fricción, donde existen numerosas expresiones para su determinación, ya sean de origen teórico o empírico, en el caso de las pérdidas menores son pocos los resultados que tienen fundamentación puramente teórica; por el contrario, lo usual es encontrar 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 los que debe tenerse mucha precaución en su utilización.

Como convención casi universal, se ha aceptado representar a las pérdidas menores como una proporción de la carga de velocidad de la sección inmediatamente aguas abajo de donde se encuentre localizado el accesorio estudiado:

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.16)$$

donde K , el coeficiente de proporcionalidad, suele llamarse coeficiente de pérdida local del accesorio, o simplemente coeficiente K del accesorio.

Aunque para la mayoría de los accesorios, se ha encontrado una variación del factor K con el número de Reynolds (Re). Se ha hallado que éste permanece constante para valores de Re superiores a 50,000. Por lo que suele considerarse constante.

A continuación, se enlistarán algunos ejemplos de accesorios o configuraciones en los sistemas de tuberías que producen una pérdida local, así como el valor del coeficiente K correspondiente.

2.3.1 PÉRDIDA POR ENTRADA

A la entrada de las tuberías se produce una pérdida por el efecto de contracción que sufre la vena líquida y la formación de zonas de separación; el coeficiente K depende, principalmente, de la brusquedad con que se efectúa la contracción del chorro. En las Figuras 2.3, 2.4, 2.5 se muestran algunos valores.

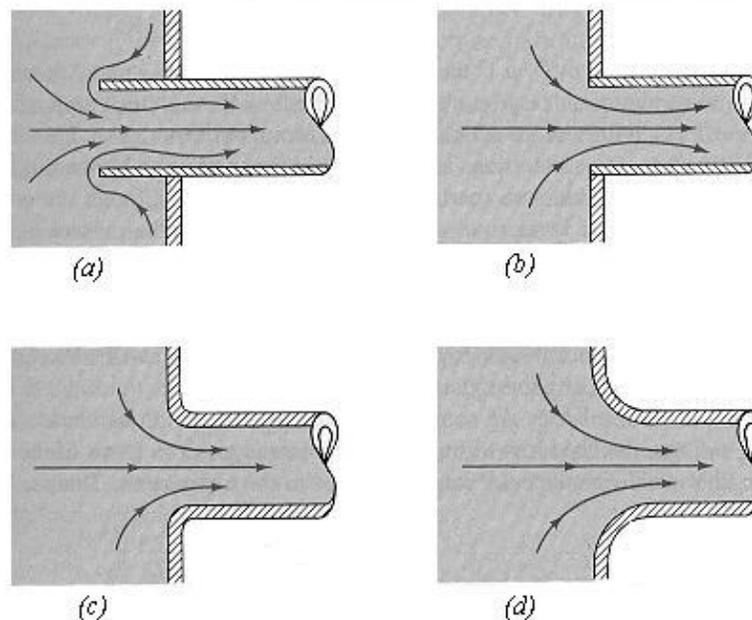


Figura 2.3 Coeficientes de pérdida. (a) Entrada de borda $K=0.8$, (b) Entrada normal $K=0.5$, (c) Entrada ligeramente redondeada $K=0.20$, (d) Entrada bien redondeada $K= 0.04$ (Munson et al., 1994).

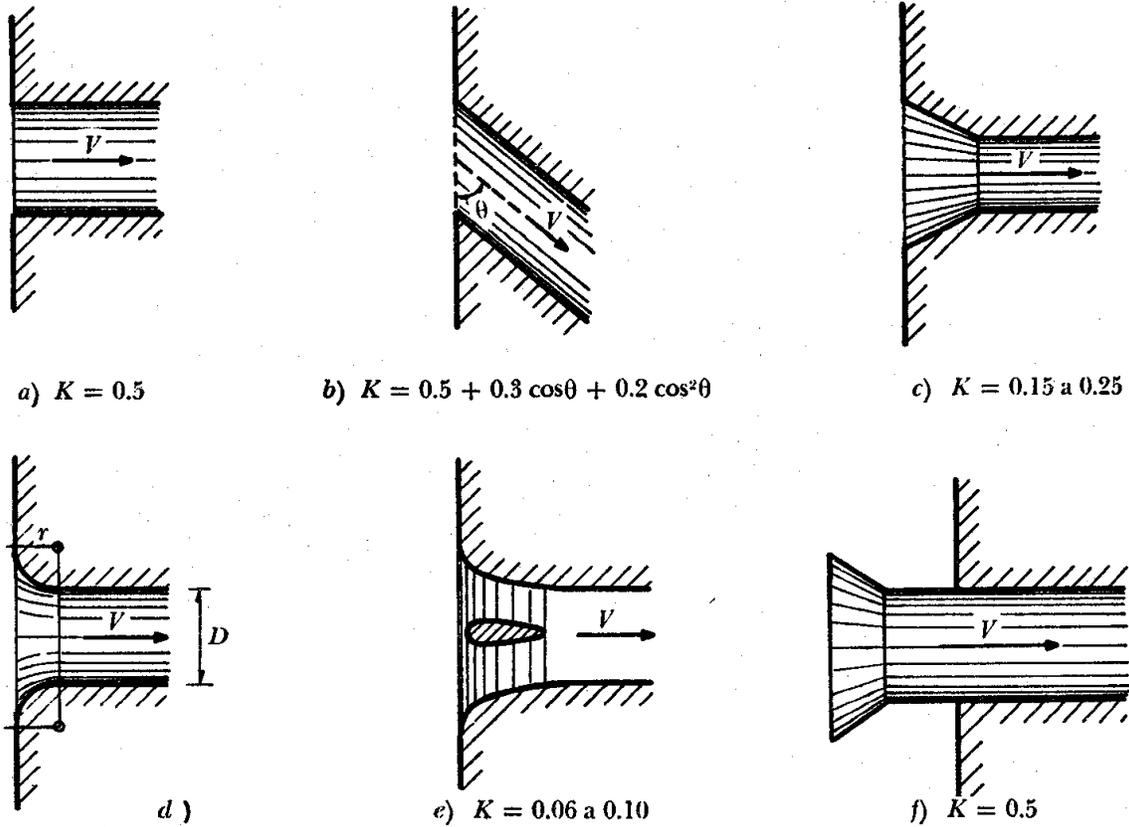


Figura 2.4 Coeficientes de pérdida (K) en la entrada (Sotelo, 1982)

Para el caso ilustrado en el inciso d) de la Figura 2.4 deberá utilizarse la Figura 2.5.

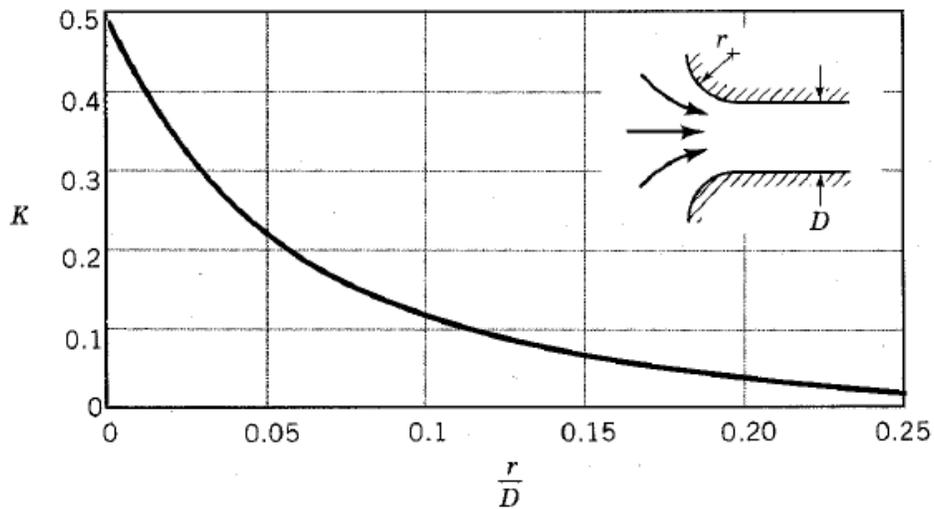


Figura 2.5 Coeficiente de pérdida (K) en entrada en función del radio de curvatura (Munson et al., 1994)

2.3.2 PÉRDIDA POR SALIDA

Esta pérdida se expresa como:

$$h_s = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (2.17)$$

Donde K se obtiene de la tabla 2.1

Tabla 2.1 Coeficiente de pérdida por salida (Sotelo, 2009)

A1/A2	K
0.1	0.83
0.2	0.84
0.3	0.85
0.4	0.87
0.5	0.88
0.6	0.9
0.7	0.92
0.8	0.94
0.9	0.965
1	1

La relación de áreas que se presenta en la tabla 2.1 se determina con base en el esquema de la Figura 2.6.

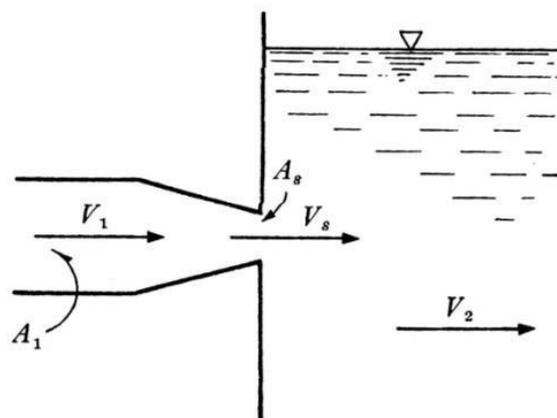


Figura 2.6 Esquema de pérdida por salida (Sotelo, 2009)

También podemos considerar los valores mostrados en la Figura 2.7 de acuerdo con la configuración de la salida de la tubería.

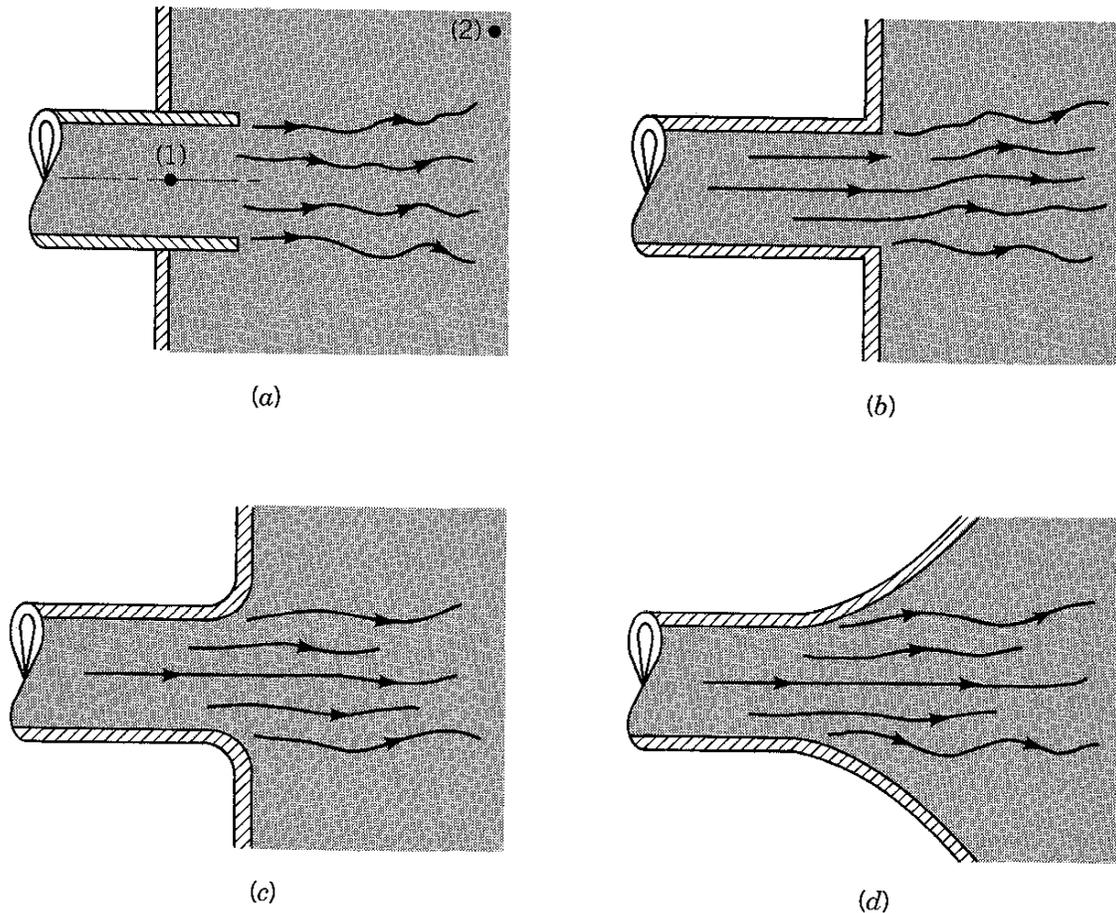


Figura 2.7 Coeficientes de pérdida. (a) Salida de borda $K=1$, (b) Salida normal $K=1$, (c) Salida ligeramente redondeada $K=1$, (d) Salida bien redondeada $K=1$ (Munson et al., 1994)

Si la descarga es al medio ambiente, $V_2 = 0$ y $h_s = K \frac{(V_1)^2}{2g}$ para $A_2 = A_1$.

2.3.3 PÉRDIDA POR AMPLIACIÓN

Esta se origina al producirse una ampliación de la sección transversal del tubo. El coeficiente K depende de la brusquedad de la ampliación (Figura 2.8) y a continuación se muestran algunas gráficas que indican el coeficiente K dependiendo de la relación en entre áreas del conducto o el ángulo con el cual se desarrolla la ampliación suave.

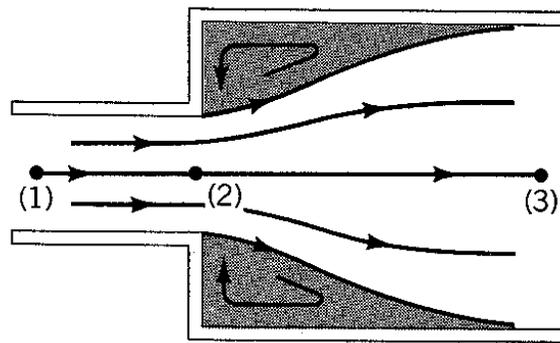


Figura 2.8 Ampliación brusca. (Munson et al., 1994)

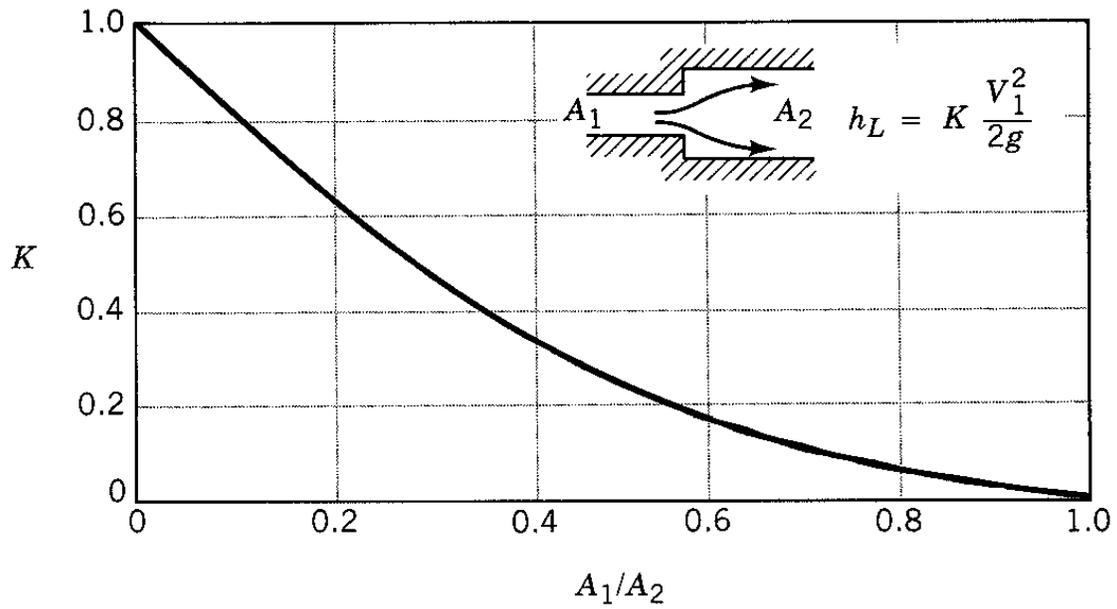


Figura 2.9 Coeficiente de pérdida (K) para expansión brusca. (Munson et al., 1994)

La pérdida mínima de energía se obtiene para ángulos de difusión $\theta = 8^\circ$.

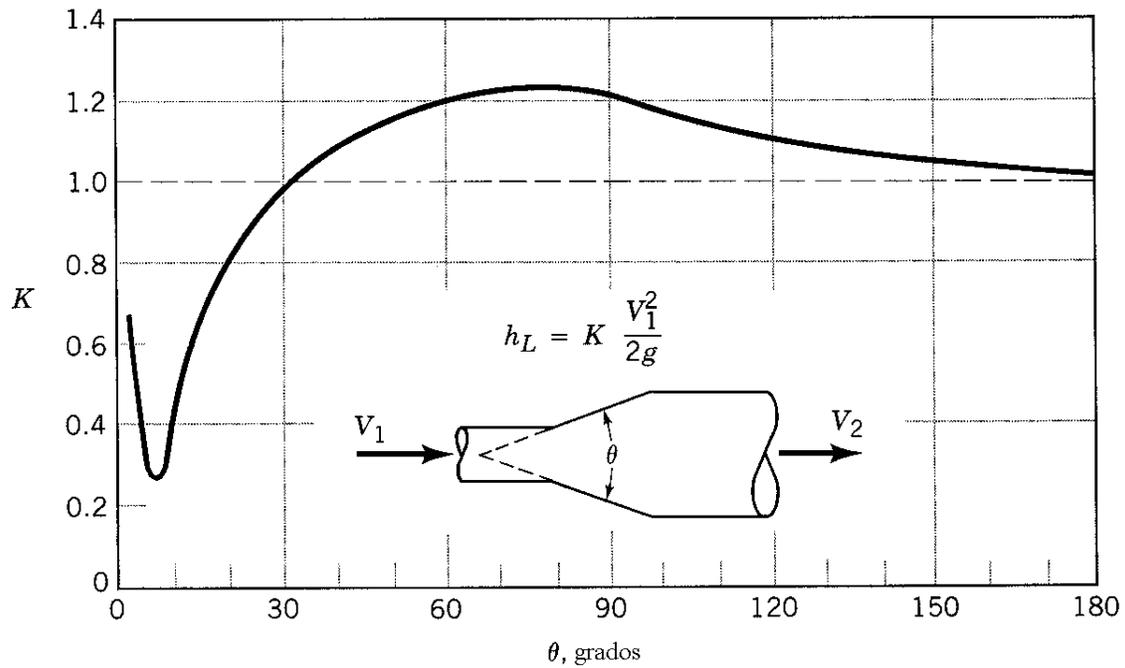


Figura 2.10 Coeficiente de pérdida (K) para expansión suave. (Munson et al., 1994)

La Tabla 2.2 contiene algunos de los valores del coeficiente K para ampliación gradual encontrados en la literatura, del mismo modo en la Tabla 2.2 se encuentran valores del coeficiente K para ampliación brusca dependiendo de las distintas velocidades del diámetro D_1 y de la relación entre ellos.

Tabla 2.2 Valores del 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 2.3 Valores del coeficiente K para ampliación brusca (Patiño, 2011)

Ampliación brusca		
	Coeficiente K	
D1/D2	V1=0.6 m/s	V1=13 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

La ampliación brusca de la sección en un tubo trae consigo una pérdida de energía por efecto de la separación del líquido de las paredes y la formación de grandes turbulencias, que es de índole diferente a la de fricción.

2.3.4 PÉRDIDA POR CONTRACCIÓN

En este caso se produce un fenómeno de contracción semejante al de entrada a la tubería, el cual también conviene que sea gradual. Si bien en este caso la pérdida es inferior a la de la ampliación, dependiendo de la brusquedad con que se efectúa la contracción, el coeficiente de pérdida está supeditado al ángulo θ al cual se produzca, de acuerdo con la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Coeficiente de pérdida por reducción gradual del ángulo θ , según Kisieliev (Sotelo, 2009)

θ	4° a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°
K	0.06 - 0.005	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35

Con objeto de evitar pérdidas grandes, el ángulo de reducción no debe exceder de un valor especificado, dicho ángulo se expresa como:

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{gD}{v}} \quad (2.18)$$

Donde

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{y} \quad V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.19)$$

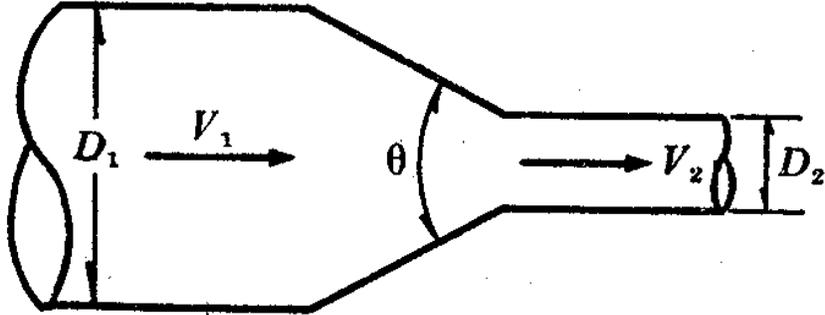


Figura 2.11 Contracción gradual. (Sotelo, 1982).

Si la contracción es brusca, como la que se ilustra en la Figura 2.12, se usan los coeficientes mostrados en la Figura 2.13, relacionando las áreas correspondientes.

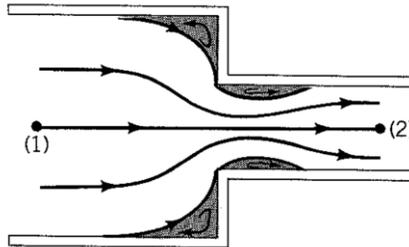


Figura 2.12 Condiciones de flujo en cambios bruscos de diámetro. Contracción, (Munson et al., 1994)

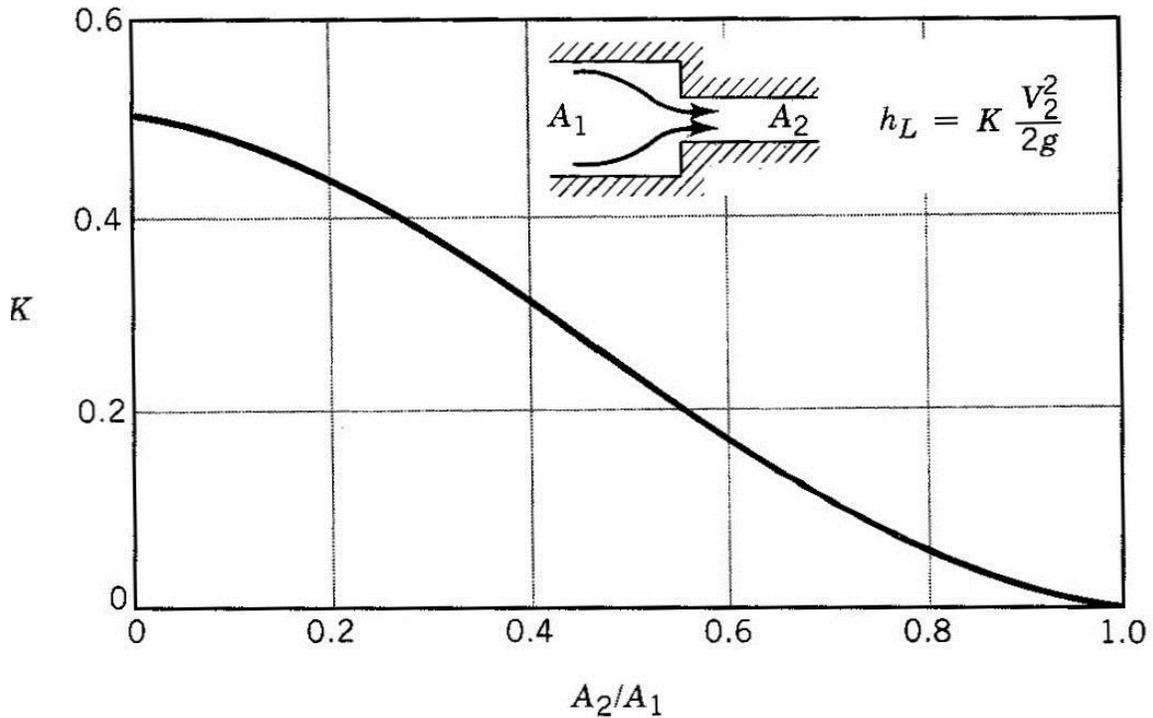


Figura 2.13 Coeficiente de pérdida (K) para contracción brusca. (Munson et al., 1994).

2.3.5 PÉRDIDA POR CAMBIO DE DIRECCIÓN

Si se visualiza el flujo en un cambio de dirección, se observa que los filetes tienden a conservar su movimiento rectilíneo en razón de su inercia. Esto modifica la distribución de velocidades y produce zonas de separación en el lado interior y aumentos de presión en el exterior, con un movimiento espiral que persiste en una distancia de 50 veces el diámetro. Si el cambio de dirección es gradual con una curva circular de radio medio R y rugosidad absoluta ϵ , para obtener el coeficiente de pérdida K se usa la gráfica de Hoffman de la Figura 2.14 que además toma en cuenta la fricción en la curva donde:

$$K = C_c \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \quad (2.20)$$

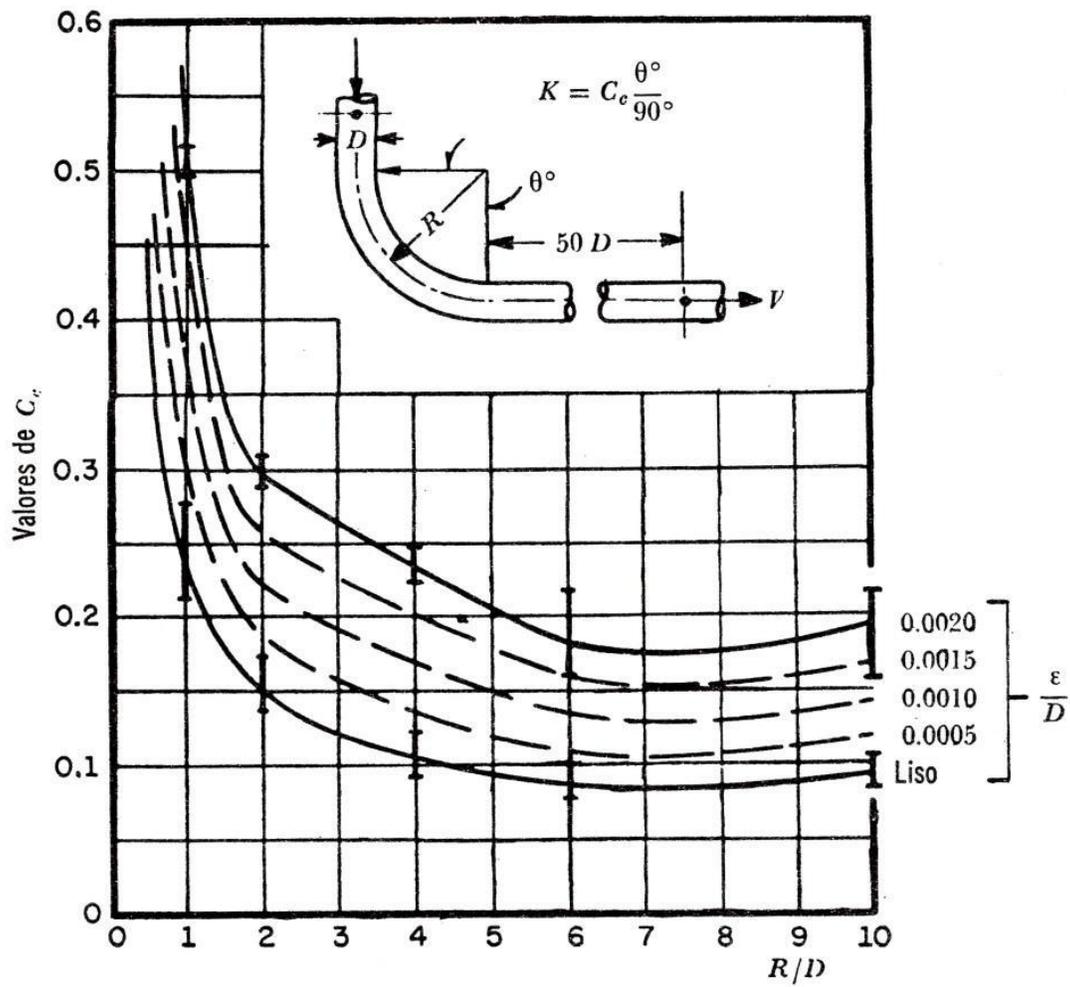


Figura 2.14 Coeficientes de C_c para curvas de diámetro constante y $Re > 2.2 \times 10^5$ en tubos rugosos (Sotelo, 2009)

Si el tubo es liso se usa la gráfica de a Figura 2.15 de Wasieliewski.

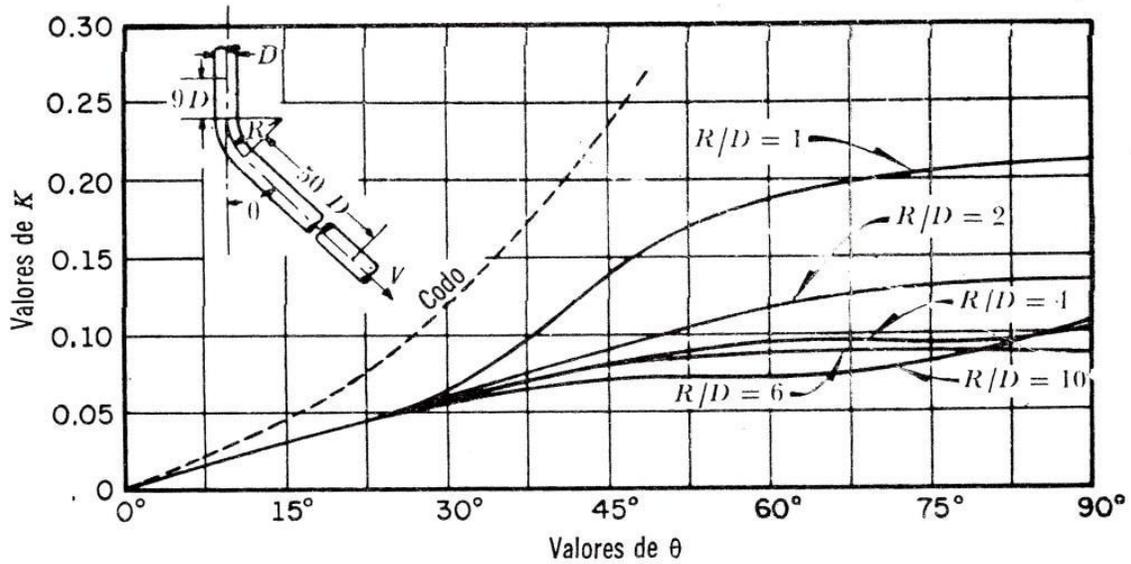


Figura 2.15 Coeficientes de pérdida en curvas de diámetro constante con superficie lisa y número de Reynolds de 2.25×10^5 (Sotelo, 2009)

Si el cambio de dirección es brusco, el coeficiente de pérdida depende del número de Reynolds como se muestra en la Figura 2.16, de Kichbach y Schubart, para diferentes ángulos.

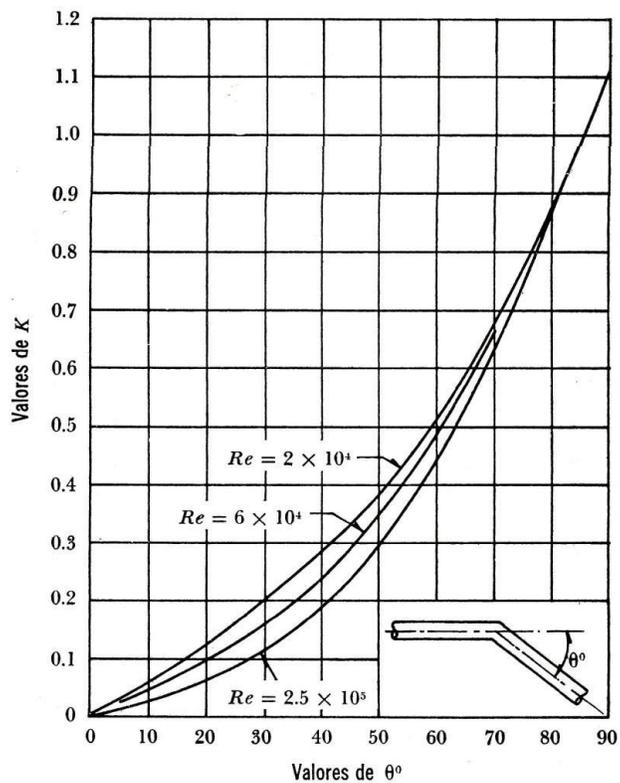


Figura 2.16 Coeficientes de pérdida K para cambio de dirección (Sotelo, 2009)

En la Figura 2.17 se muestran algunos patrones de flujo que se pueden presentar en un sistema, así como su coeficiente de pérdida correspondiente.

Figura					
K	0.5	1	1.5	3	0.05

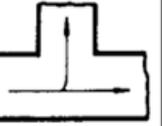
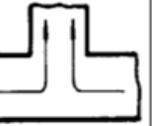
Figura				
K	0.1	0.15	2	3

Figura 2.17 Coeficiente por cambio de dirección. (Mataix, 1982).

2.3.6 PÉRDIDA POR VÁLVULAS

Como se mencionó en el capítulo 1, los sistemas de distribución tienen diferentes accesorios para facilitar su manejo y operación. Las válvulas son parte importante de los sistemas, por lo que se debe tomar en cuenta la magnitud de la pérdida de energía que originan. La pérdida de carga que produce el flujo a través de este dispositivo depende de la posición operacional del elemento que regula el flujo, la cual puede variar de totalmente abierta a totalmente cerrada. La pérdida de carga en estos dispositivos también depende de su diseño y este varía de acuerdo con el fabricante, quien en la mayoría de los casos, proporciona los valores correspondientes.

Los valores típicos del coeficiente K para válvulas de compuerta, de mariposa y de altitud, en su rango completo de operación se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Valores típicos de K para válvulas (Meneses, 2012)

% Abertura	Mariposa	Compuerta	Altitud
100	0.3	0.1	4.2
90	0.5	0.2	4.8
80	0.9	0.4	5.5
70	2.5	0.8	6.6
60	6.3	1.7	8.5
50	14.5	3.3	11.8
40	32.6	5.8	19.0
30	80.0	10.0	41.0
20	220.0	23.0	171.0
10	1000.0	80.0	2500.0
0	(Cerrado,	flujo	nulo)

La Figura 2.18 nos proporciona los valores promedio de K para válvulas de compuerta, de mariposa y globo de acuerdo a su apertura.

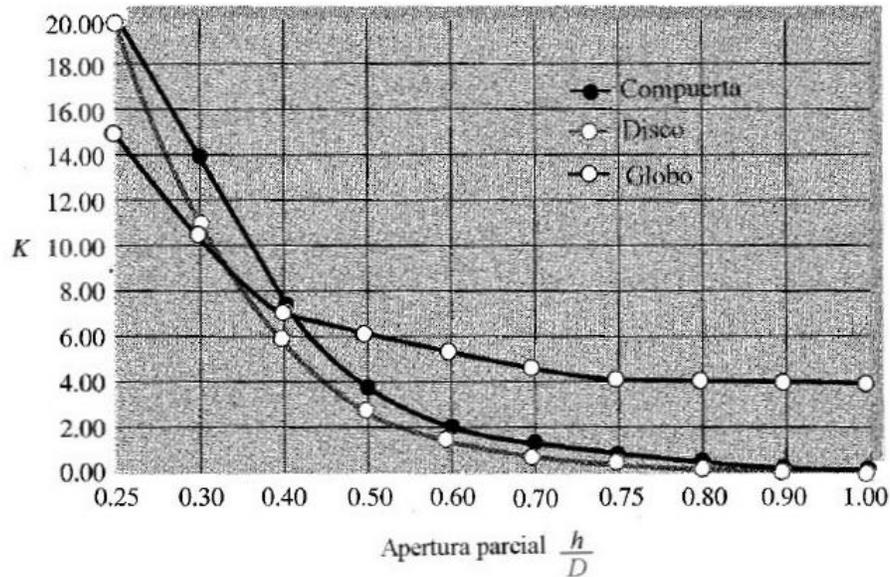


Figura 2.18 Coeficiente promedio de pérdida (K) para válvulas parcialmente abiertas, compuerta, disco con eje horizontal o mariposa y globo. (White, 1994).

2.3.7 PÉRDIDA POR BIFURCACIÓN

Se entiende por bifurcación, aquel punto de una tubería de la que sale un nuevo ramal llamado tubería secundaria, dividiéndose el gasto que llega en dos gastos divergentes. La pérdida de energía en una bifurcación de conductos depende (además del ángulo que forman la tubería secundaria con la principal) de la relación entre los diámetros de ambas tuberías y de la dirección de la corriente.

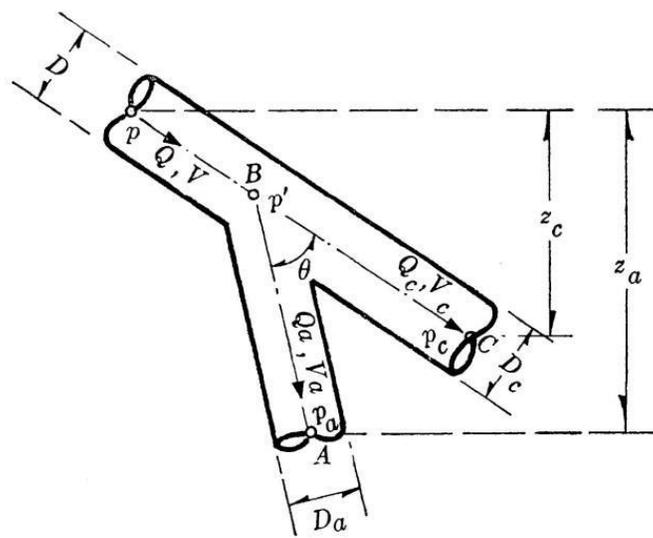


Figura 2.19 Pérdida por bifurcación (Sotelo, 2009)

Como se muestra en la Figura 2.19, en una bifurcación se designan secciones (a y c) próximas al punto en que se realiza la bifurcación. Los coeficientes K_a y K_c son dependientes de la relación entre gastos Q_a/Q y entre los diámetros; del ángulo con que se realiza la bifurcación y del grado de redondez de los cantos agudos, como en la Figura 2.19 $D=D_c$, los autores Vogel, Petermann y Kinne, obtuvieron los resultados de la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Coeficientes de pérdida para bifurcaciones en tuberías (cantos agudos) (Sotelo, 2009)

$\frac{Q_a}{Q}$	Bifurcación			
	$\theta = 90^\circ$		$\theta = 45^\circ$	
	K_a	K_c	K_a	K_c
0	0.95	0.04	0.9	0.04
0.2	0.88	-0.08	0.68	-0.06
0.4	0.89	-0.05	0.5	-0.04
0.6	0.95	0.07	0.38	0.07
0.8	1.1	0.21	0.35	0.2
1	1.28	0.35	0.48	0.33

2.3.8 PÉRDIDA EN CRUCES DE TUBERÍAS

En este segundo capítulo se han mencionado algunos accesorios que provocan pérdidas de energía y los coeficientes correspondientes para poder estimar dicha pérdida, sin embargo este trabajo se enfoca al estudio de las pérdidas provocadas por la instalación de cruces.

Actualmente, ha cobrado importancia este tipo de pérdidas de energía debido a que los cruces son frecuentemente utilizados y por mucho tiempo se ha despreciado su efecto al momento de analizar una red.

Los cruces son utilizados en diversas industrias, tales como la del petróleo, en la generación de electricidad, gas natural, productos químicos, construcción naval, fabricación de papel y la metalurgia. También son empleados actualmente en gran variedad de redes de distribución de agua a presión, como por ejemplo sistemas de rociadores contra incendios, sistemas de agua potable y sistemas de riego.



Figura 2.20 Cruce de tuberías en un sistema de distribución de agua.

Las redes contra incendio son muy comunes en edificios de oficinas, almacenes departamentales, fábricas, teatros y en general, construcciones con grandes superficies. Estas tienen la particularidad de estar compuestas por tuberías con diámetros pequeños y generalmente son de acero galvanizado. Entre los materiales más usados se encuentran el polietileno, polipropileno y el PVC.

El PVC es el material recomendado debido a su resistencia, a su durabilidad y confiabilidad en las uniones, ya que no necesita roscado ni calentado. A continuación, en la Figura 2.21 se muestra un esquema de un sistema de riego.

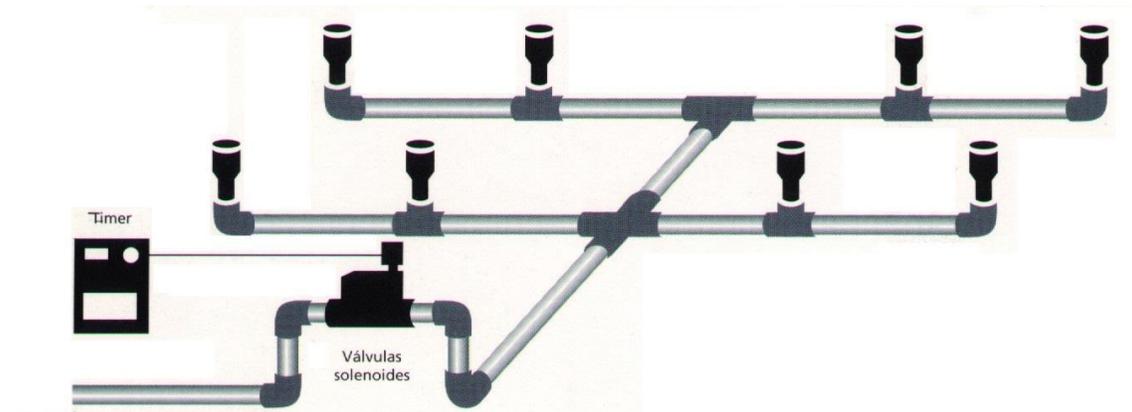


Figura 2.21 Esquema de un equipo de riego de aspersión con tuberías y accesorios de PVC

La literatura contiene muy poca información acerca de la pérdida de energía por cruces, es por ello que surge la necesidad de recopilar información acerca de este tema para poder dar seguimiento al estudio de este accesorio.

2.3.8.1 ESTADO DEL ARTE

En 1996, Miller dedica un capítulo completo a lo que denomina 'flujos combinados y divididos', para hacer referencia a aquellos accesorios que convierten varios flujos en uno solo, o dividen uno en varios más pequeños. Es el caso de las Tees (3 tramos), Yees (3 tramos en diversos ángulos), Cruces (4 tramos) y Estrellas (hasta 6 tramos). El autor hace mayor énfasis en los accesorios con seis tramos que en los de cuatro.

En su libro *Sistemas de Flujos Internos*, Donald S. Miller muestra distintos coeficientes K para el flujo a través de una cruz pero la información que proporciona está incompleta, ya que no utiliza todos los escenarios de flujo, los cuales se muestran en la Figura 2.22.

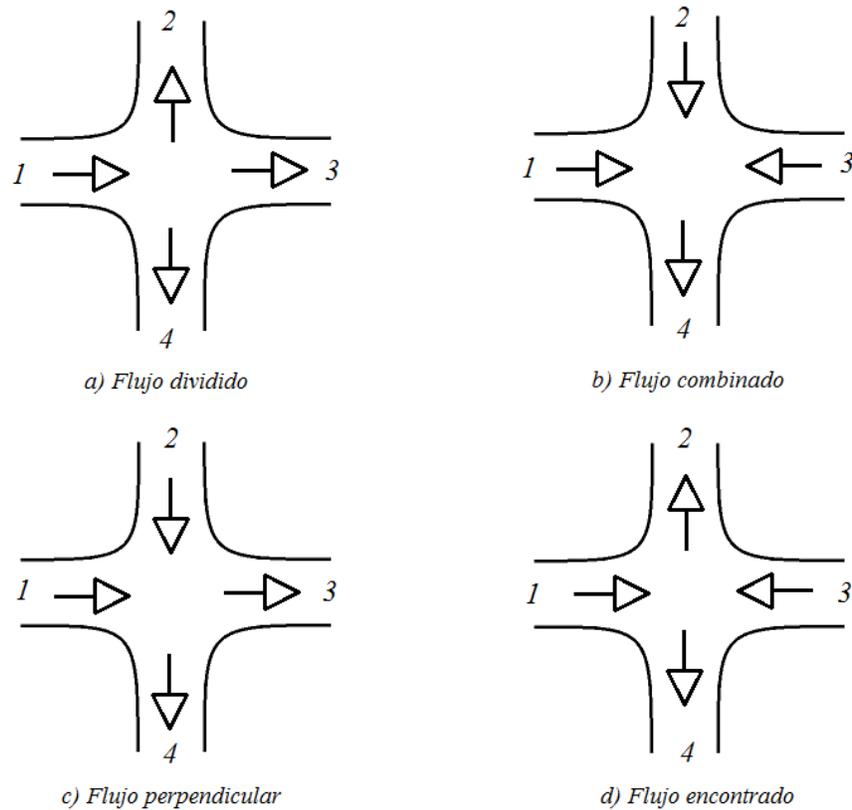


Figura 2.22 Posibles escenarios de flujo en una cruz

Sharp (2009) estudió un cruce para tubería de acero al carbón de 6" (15.2 cm) de diámetro nominal. Como resultado, el autor obtiene una serie de gráficas de las que pueden determinarse los coeficientes K, tres para cada cruz, en función de algunas relaciones de gastos existentes en ella.

Patiño (2011) investigó los flujos combinado y dividido en cruces de tuberías de PVC de distintos diámetros nominales ½" (13mm), ¾" (19mm), 1" (25mm), 1 ¼" (32mm) y 1 ½" (38mm). Como resultado, el autor obtiene una serie de gráficas de las que pueden determinarse los coeficientes K.

Después de analizar la información encontrada se concluye que no existen coeficientes de pérdida estandarizados y por lo tanto se tienen que hacer consideraciones individuales al analizar este tipo de pérdida.

Por otro lado, los programas informáticos son incompletos en su análisis de las uniones de tuberías. Estas aplicaciones de software normalmente permiten un coeficiente de pérdida constante de una cruz o de otras uniones múltiples de tuberías al ser introducidas por el

usuario, para el análisis, generalmente como una pérdida en la tubería de aguas abajo. Este enfoque no siempre es práctico o totalmente preciso.

Wood (1993) demostró que en redes con tubos cortos las pérdidas locales pueden producir errores de hasta 400 % en cálculos cuando se utiliza un coeficiente de pérdida de energía constante para una Tee en lugar de los coeficientes correctos para cada tramo. Muestra la importancia de conocer y utilizar la colocación correcta de los coeficientes K para el cálculo de flujo en redes de tuberías, sobre todo cuando las pérdidas por fricción son pequeños. Con la realización de este estudio, la pérdida de información energética correcta para cada tramo de una cruz estará disponible para ayudar en los cálculos de diseño y análisis de redes de tuberías de cruces.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo consiste en determinar coeficientes de pérdida de energía provocados por el flujo del agua a través de un cruce de tuberías, considerando diferentes diámetros y diferentes patrones de flujo, por lo que era necesario diseñar un dispositivo que permitiera realizar las mediciones.

3.1 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO

El dispositivo se encuentra en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM). Para el diseño de este dispositivo se tomaron en cuenta diversas consideraciones para su correcto funcionamiento.

Para garantizar la recirculación del agua, se configuró un sistema mixto de bombeo y descarga a gravedad. Una bomba de 2 hp succiona el agua desde un cárcamo con dimensiones de 2.10 metros de largo, 1.50 metros de ancho y 0.70 metros de profundidad (2.20 m^3 de volumen), el agua sube hasta dos tinacos de 400 litros de capacidad cada uno, ubicados a una altura de 3.40m sobre el nivel del piso del laboratorio. Una vez que los tinacos están llenos, el agua desciende y circula por las tuberías de tal forma que al salir de ellas, pueda ser recirculada al cárcamo de bombeo. De esta forma, no se requerirían fuentes continuas de agua, y se descartarían posibles desperdicios del líquido.

Con este sistema combinado de bombeo-gravedad, podía cumplirse también con el requisito de flujo permanente. Para ello, se dotaron los tinacos con tuberías de rebase que dirigían el agua de exceso al cárcamo de bombeo. De este modo, los tinacos tendrían niveles de agua constante.

Adicionalmente, cerca de la salida de la bomba, se ramificó la tubería de impulsión con regreso al cárcamo, y se puso una válvula que permitiera regular indirectamente la cantidad de agua que llegaría a los tinacos.

Con el fin de permitir el intercambio de los cruces de diferentes diámetros, acoplándolos rápidamente a las alimentaciones y salidas del agua, el material debería ser liviano, de fácil manipulación, y con accesorios de acoplamiento tipo rosca, que no requirieran uso de soldaduras o cortes continuos del sistema. Por esto, se decidió trabajar con tubería y accesorios de PVC, material ampliamente difundido, de características y propiedades conocidas. El sistema de tuercas también permite convertir un cruce de doble

alimentación y doble salida, en cualquier otro que se requiriera para los patrones de flujo de interés. En la Figura 3.1 se puede observar un esquema del dispositivo experimental.

Las válvulas en entradas y salidas se usaron con el fin de permitir la variación de los gastos y poder obtener un mayor número de mediciones.

Los medidores de flujo utilizados, se ubicaron en las entradas y salidas de los cruces. Estos funcionan mediante una turbina alineada con el flujo, y muestran los gastos instantáneos en una pantalla digital ubicada en su parte superior, con una incertidumbre de ± 1.0 l/h. En la Figura 3.2 se muestra el aspecto exterior del medidor, así como un corte longitudinal que permite observar la ubicación de la turbina de medición.

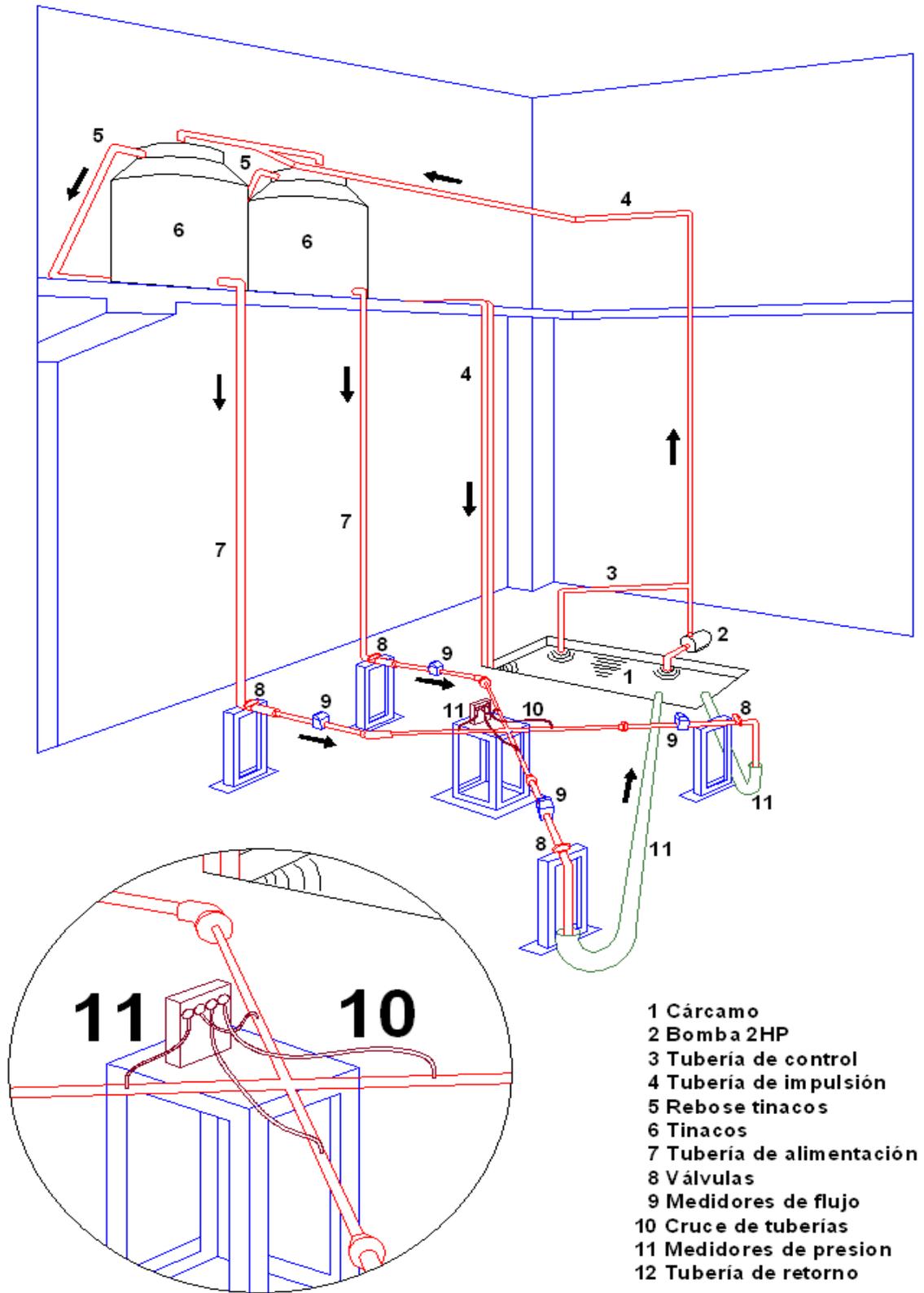


Figura 3.1 Esquema del modelo experimental



Figura 3.2 Medidor de flujo y esquema del interior

Para garantizar una medición sin perturbaciones, los medidores se ubicaron lejos de cualquier tipo de accesorio, válvula o cambio de dirección, a una distancia aproximada de diez veces el diámetro de la tubería conectada a los mismos. Los cuatro medidores empleados tenían conexiones en sus extremos de 1", por lo que se conectaron a tubos de 1" de diámetro nominal (29.80 ± 0.01 mm reales) y de 30.0 cm de longitud libre.

Finalmente, se usaron cuatro sensores de presión conectados mediante mangueras de diámetro pequeño a unas boquillas ubicadas aguas arriba y aguas abajo de los cruces. Las boquillas se colocaron en la parte superior del tubo, para evitar perturbaciones adicionales en el flujo. Las mangueras son transparentes con el fin de verificar desde el exterior la posible presencia de burbujas de aire que pudieran distorsionar las lecturas de los sensores. Las boquillas fueron ubicadas a una distancia de 10 diámetros (10D) de las cruces.

Los sensores de presión estaban conectados a un modulador, que se encargaba de convertir las señales físicas a digitales, para posteriormente ser almacenadas en el disco duro de una computadora. Los sensores pueden registrar una presión máxima de 50 KPa (5.10 mca), con una incertidumbre de ± 0.025 KPa (± 0.0025 mca). Las lecturas de presión eran tomadas cada segundo.

De esta forma, se contó con un número importante de datos para reducir la incertidumbre en los cálculos. Los sensores y su forma de conexión a las tuberías, así como el modulador se muestran en las Figuras 3.3 y 3.4, respectivamente.

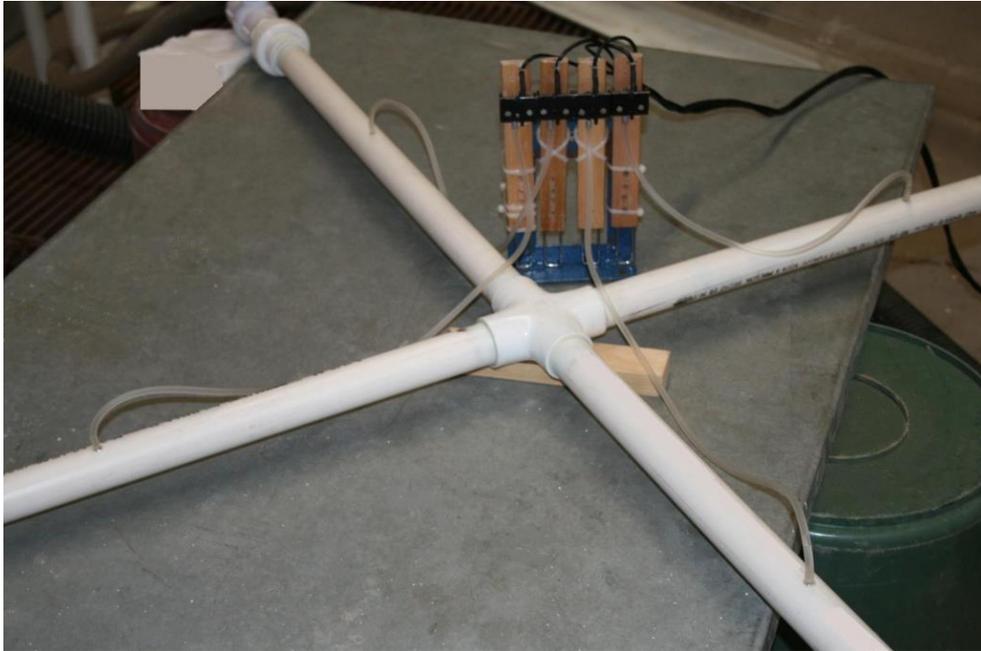


Figura 3.3 Sensores de presión



Figura 3.4 Modulador de presión

3.2 MEDICIONES

Se diseñaron diferentes experimentos con diversas consideraciones para lograr una gran variedad de resultados a analizar.

Se determinó que se manejarían tres de los cuatro posibles patrones de flujo: flujo dividido (el cruce es alimentado por un solo ramal y el caudal sale por los tres restantes), flujo perpendicular (se alimenta por dos ramales perpendiculares entre sí y el agua sale por los 2 restantes) y flujo encontrado (el agua entra al cruce por dos ramales opuestos y sale por los dos restantes). Lo anterior se ilustra en la Figura 2.22. Se consideraron diferentes diámetros de tubería de PVC (13mm, 19mm, 25mm, 32mm, 8mm y 50mm). Con el propósito de obtener una gran cantidad de puntos experimentales, se determinó que el número mínimo de pruebas sería de 20 por cada diámetro y patrón de flujo, para una mejor estimación de los coeficientes K.

Relacionado con el punto anterior, cada prueba consistió en variar con cierto orden las válvulas de las cuatro ramas del cruce para considerar los posibles escenarios que se presentan en las redes de tuberías. Para ejemplificar este método de prueba se presenta la Tabla 3.1, donde se muestra la variación de gastos de entrada y de salida en la medición con el cruce de 13 mm de diámetro con flujo perpendicular.

Con el propósito de evitar cambios importantes en los niveles de agua en los tinacos y de garantizar que se tenga un régimen permanente, se estimó que era apropiado realizar pruebas de 2 minutos de duración, para obtener un total de 120 datos por prueba, ya que el modulador puede tomar mediciones cada segundo.

Tabla 3.1 Variación de gastos de entrada y de salida, flujo perpendicular 13 mm.

Prueba No.	Gastos			
	Q1 (l/h)	Q2 (l/h)	Q3 (l/h)	Q4 (l/h)
1	987.4	1133	1244	880.3
2	971.5	1112	1226	862.1
3	955.5	1089	1206	843.9
4	937.3	1071	1183	827.9
5	896.3	1060	1142	809.7
6	784.7	1060	1083	762
7	345.1	1347	1005	684.5
8	996.5	1126	1240	882.6
9	985.2	1103	1222	864.4
10	973.7	1071	1196	846.2
11	960.1	1037	1169	825.6
12	953.2	991.9	1142	800.6
13	955.5	875.8	1078	759.3
14	1153	402	905.3	654.6
15	941.8	1144	1194	889.2
16	903.1	1092	1087	907.7
17	828	994.2	850.8	974.4
18	682.2	828	397.4	1112
19	1010	1190	1215	987.4
20	985.2	1156	1215	925.9
21	953.3	1108	1226	832.2
22	841.6	964.7	1351	454.2

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo presenta los datos obtenidos en el laboratorio y el proceso que se siguió para la obtención de los coeficientes de pérdida K en cruces de tuberías.

4.1 NOMENCLATURA

Con el fin de mantener organizados los datos obtenidos y lograr un mejor procesamiento de los mismos, se siguió la nomenclatura mostrada en la Figura 4.1 para los tres casos de estudio.

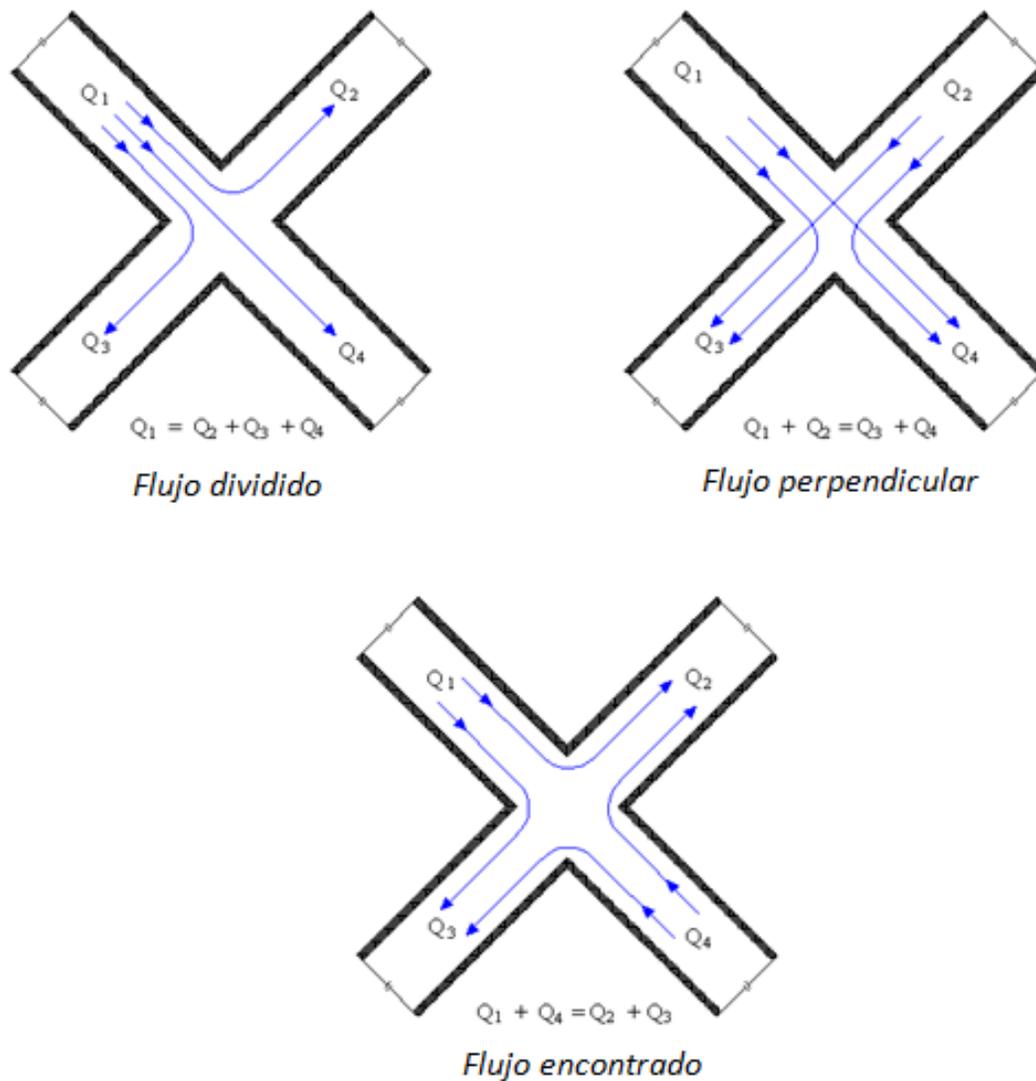


Figura 4.1 Nomenclatura para los diferentes patrones de flujo

4.2 DEDUCCIÓN DE LAS EXPRESIONES Y ANÁLISIS DE KI

Las expresiones necesarias para estimar los valores de los coeficientes de pérdidas K a partir de los datos medidos en el laboratorio, pueden obtenerse a partir de un balance de energía entre dos puntos cualesquiera del cruce, siempre que estén en tramos diferentes de éste. Cabe mencionar que el cálculo de las pérdidas por fricción se realizó con ayuda de la ecuación de Darcy-Weisbach y el coeficiente de fricción f , se calculó mediante la ecuación explícita de Swamee-Jain.

4.2.1 FLUJO DIVIDIDO

En este caso existe un único tramo de alimentación, por lo que no es necesario calcular promedios de los coeficientes de pérdidas menores. Basta con hacer balances de energía, entre un punto del tramo de entrada y en cada uno de los puntos en los tres tramos de salida.

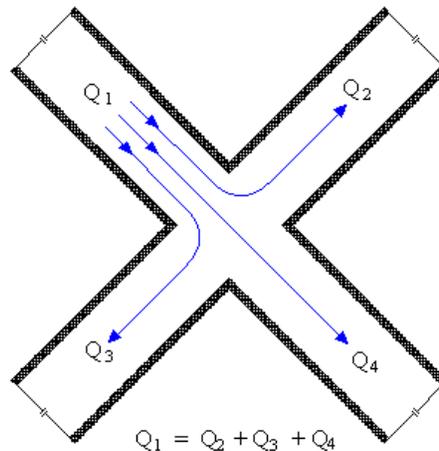


Figura 4.2 Flujo dividido o de alimentación simple

Por ejemplo, haciendo el balance de energía entre los puntos de los tramos 1 y 3 (Figura 4.2), se tiene que:

$$E_1 - h_{f1} - h_{f3} - h_{L3} = E_3 \quad (4.1)$$

Donde E_i representa el nivel de energía en el punto i ; h_{fi} , las pérdidas por fricción en el tramo comprendido entre el punto i y el centro del cruce; y h_{L3} , las pérdidas menores correspondientes al tramo que une al punto 3 con el centro del cruce. De la ecuación 4.1 se puede despejar K_3 :

$$K_3 = \frac{(E_1 - E_3) - h_{f1} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \quad (4.2)$$

Para el caso del flujo dividido, las expresiones que se encontrarían serían las siguientes:

$$K_2 = \frac{(E_1 - E_2) - h_{f1} - h_{f2}}{V_2^2 / 2g} \quad (4.3)$$

$$K_3 = \frac{(E_1 - E_3) - h_{f1} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \quad (4.4)$$

$$K_4 = \frac{(E_1 - E_4) - h_{f1} - h_{f4}}{V_4^2 / 2g} \quad (4.5)$$

ANÁLISIS

Con el objetivo de obtener las expresiones buscadas en este trabajo, se determinó que los parámetros con mayor influencia en el análisis de las pérdidas ocasionadas por la presencia de un cruce de tuberías, son el gasto y el diámetro del cruce. Se decidió relacionar dichos parámetros por medio de otro adimensional, el cual es el número de Reynolds. Este parámetro se relacionó con los correspondientes coeficientes de pérdida determinados durante el análisis numérico de los datos experimentales.

Las primeras relaciones establecidas fueron las de los coeficientes de pérdida en los tramos de salida del cruce versus el número de Reynolds "Re" correspondiente a los mismos tramos, es decir, para el caso del flujo dividido: Re_2 vs K_2 , Re_3 vs K_3 y Re_4 vs K_4 . Sin embargo se observó que era importante relacionar además cada coeficiente con, por lo menos, un parámetro de alguna de las dos entradas, ya que un Re de una de las salidas, podría provenir de múltiples combinaciones de Re de los tramos de alimentación.

En las Figuras 4.3 a 4.5 se presentan las gráficas que relacionan el coeficiente de pérdida con su correspondiente número de Reynolds.

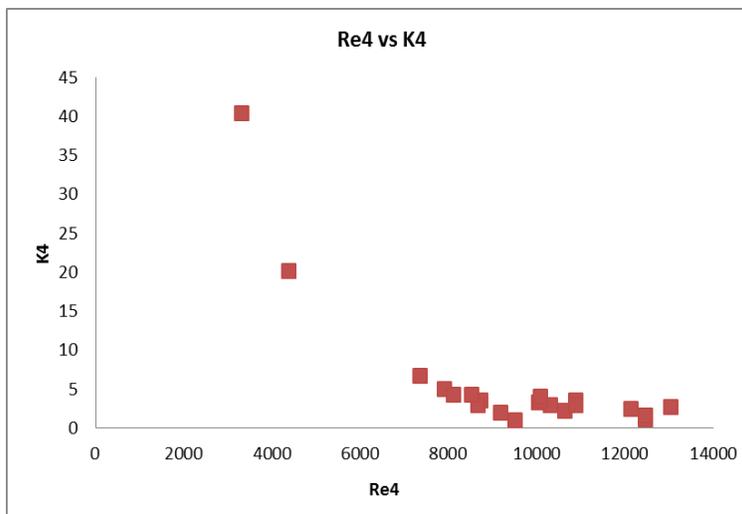
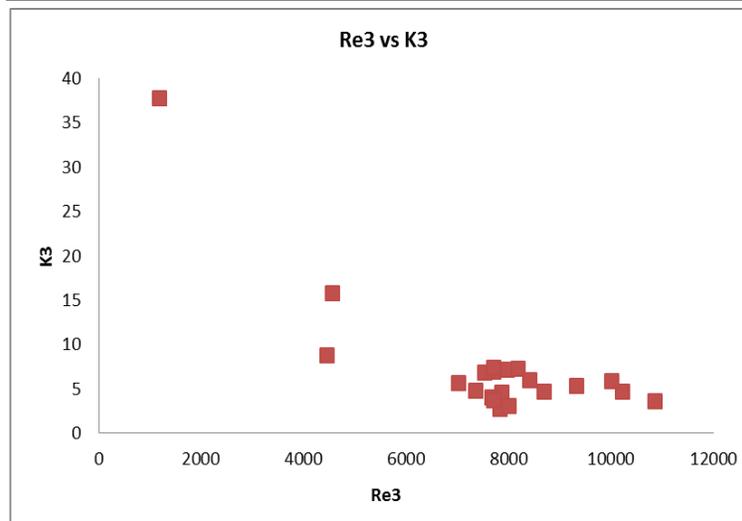
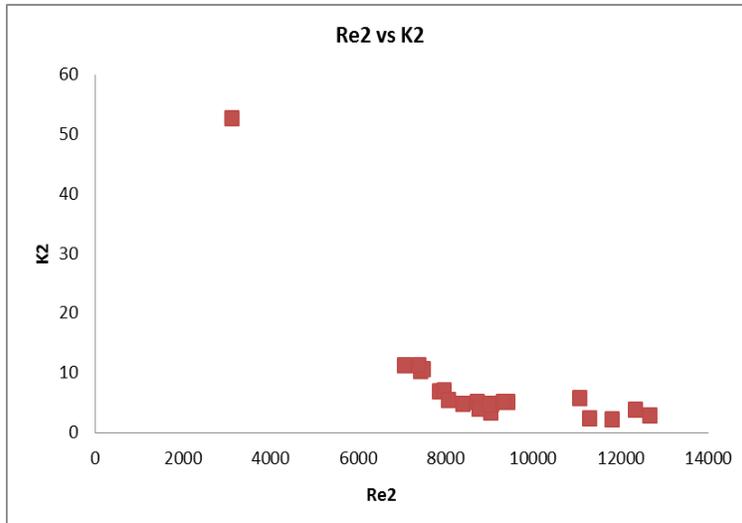


Figura 4.3 Gráficas de Re contra K para el cruce de 19mm

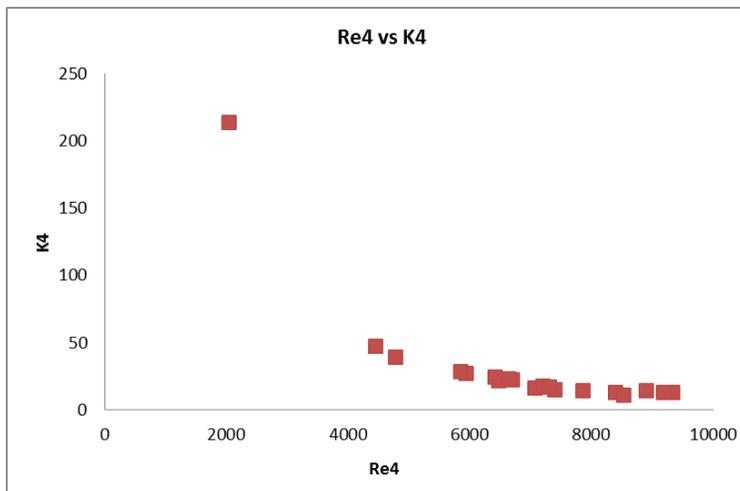
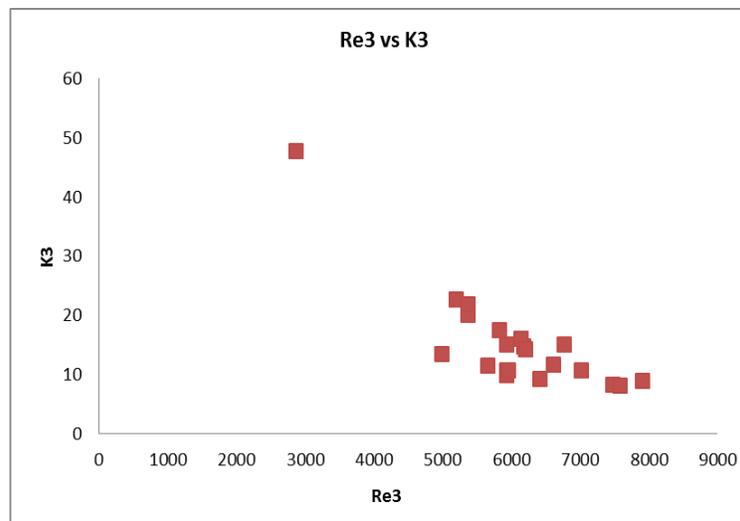
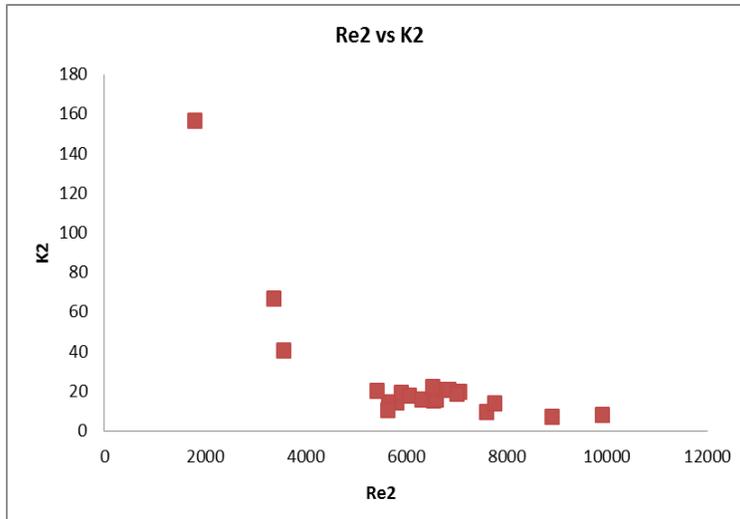


Figura 4.4 Gráficas de Re contra K para el cruce de 25mm

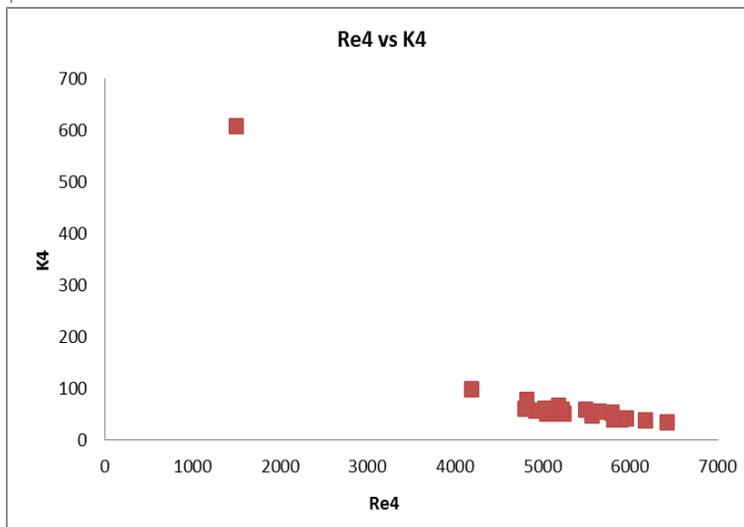
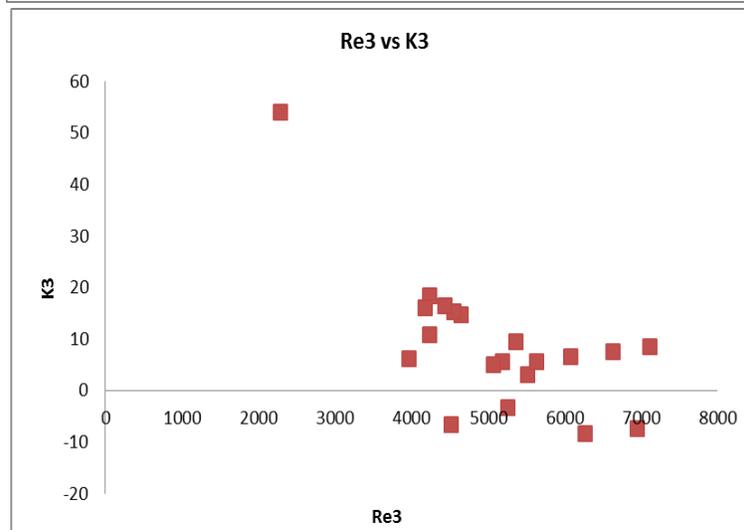
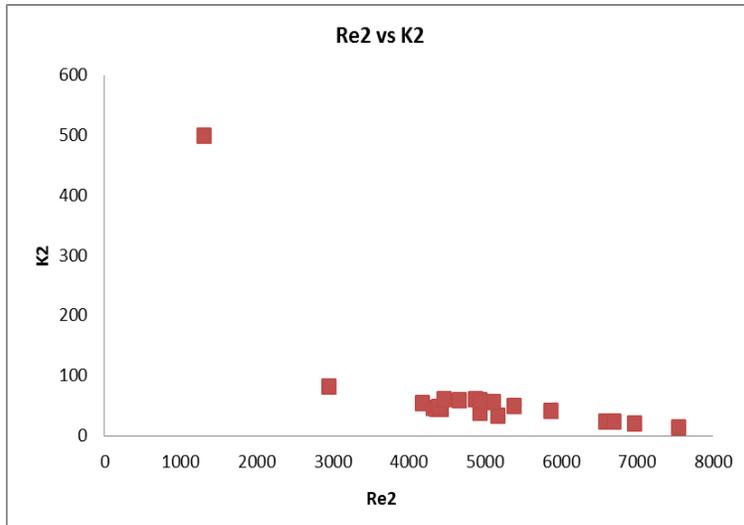


Figura 4.5 Gráficas de Re contra K para el cruce de 32mm

En las Figuras 4.6 a 4.14 se muestran las relaciones entre los coeficientes de pérdida y los números de Reynolds del tramo de entrada y de los de salida, así como sus respectivas líneas de tendencia.

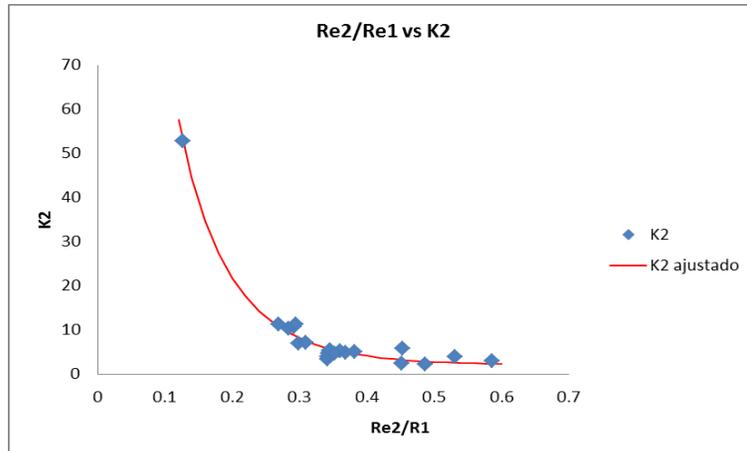


Figura 4.6 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 19mm

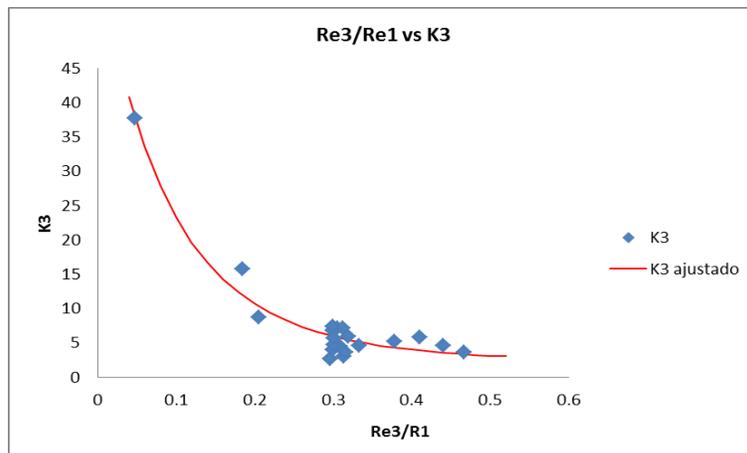


Figura 4.7 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm

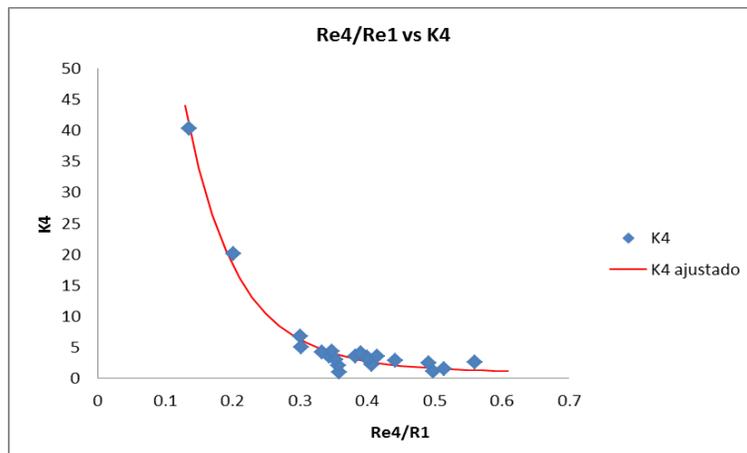


Figura 4.8 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 19mm

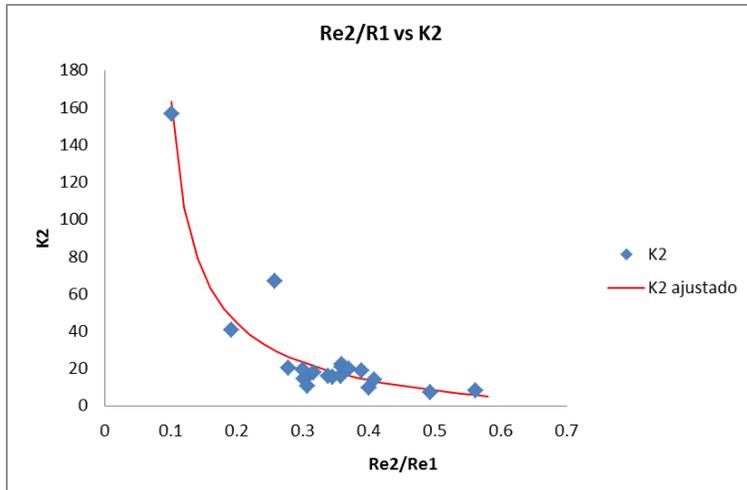


Figura 4.9 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 25mm

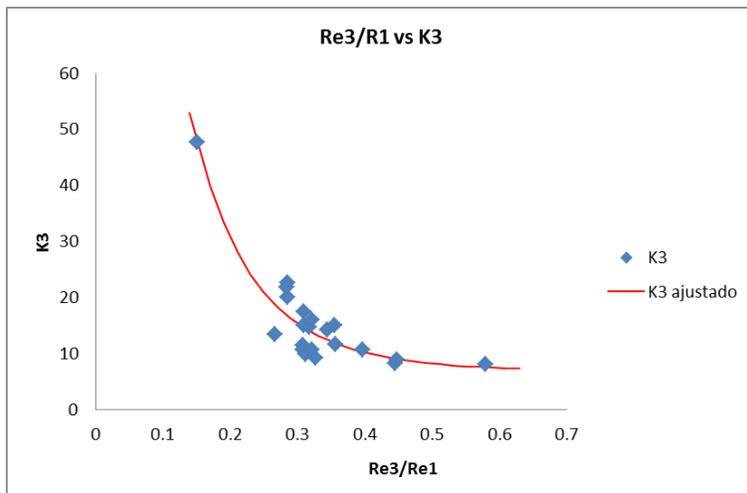


Figura 4.10 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 25mm

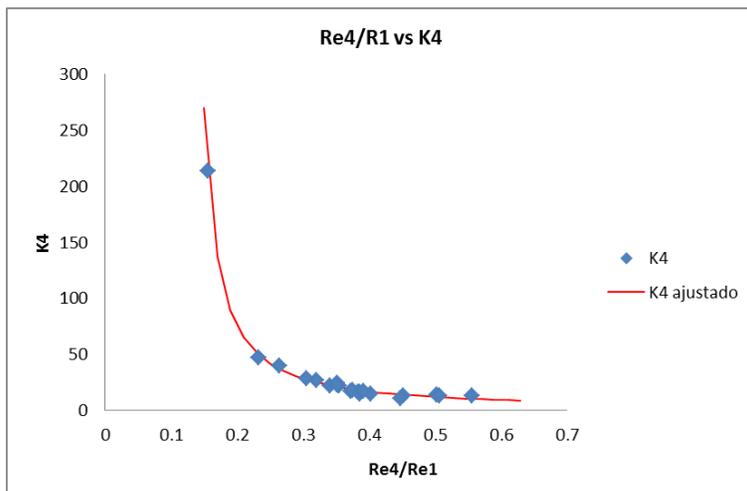


Figura 4.11 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 25mm

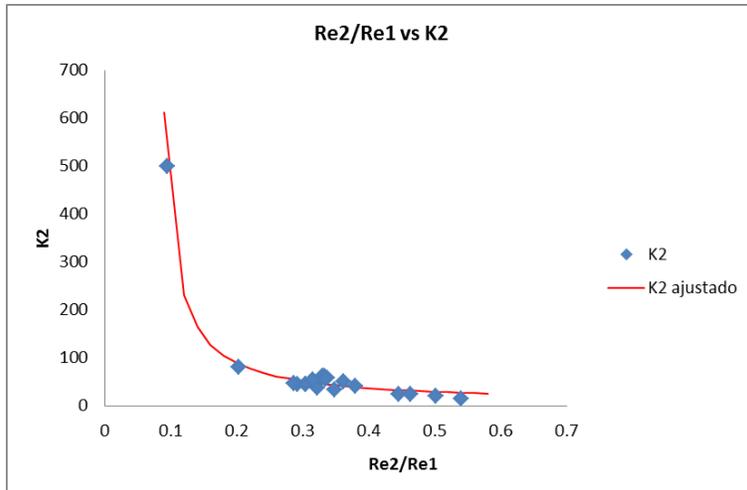


Figura 4.12 Gráfica de Re_2/Re_1 contra K_2 para el cruce de 32mm

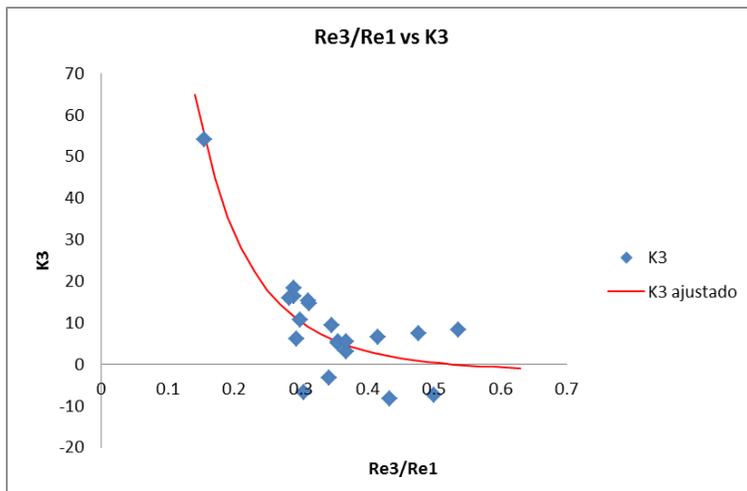


Figura 4.13 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 32mm

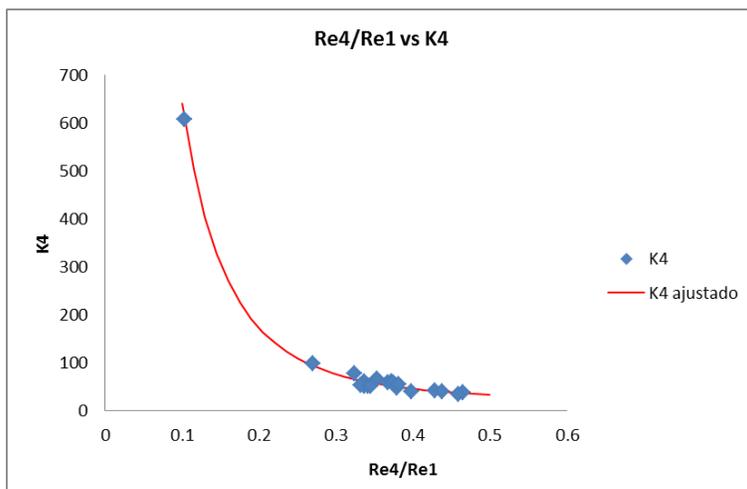


Figura 4.14 Gráfica de Re_4/Re_1 contra K_4 para el cruce de 32mm

ECUACIONES DE AJUSTE

Patiño (2011) determinó que en la tendencia general de los puntos, era necesario considerar curvas que tuvieran las siguientes características: asintótica al eje de las ordenadas, monótona decreciente, cóncava hacia arriba y asintótica a alguna recta paralela al eje de las abscisas. Se ajustaron entonces funciones exponenciales negativas y potenciales inversas de varios tipos, siendo en todos los casos las segundas, las que presentaron mejores resultados. El parámetro empleado para evaluar la calidad de los ajustes fue el coeficiente de determinación, R^2 , encontrado en cada proceso. La forma general de las funciones con mejor ajuste presentaba la siguiente forma:

$$K_{ajust} = \frac{a}{\left(\frac{Re_{sal}}{Re_{ent}} + b\right)^c} + d \quad (4.6)$$

Donde los coeficientes a, b, c y d, representan los parámetros a estimar mediante el proceso de ajuste. La Tabla 4.1 contiene las expresiones de las curvas mostradas en las Figuras 4.6 a 4.14, correspondientes a los diámetros de 19, 25 y 32mm. Para cada caso se presenta también el valor del coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 4.1 Ecuaciones de ajuste para Flujo dividido

Diámetro	Figura	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R^2
19 mm	4.6	K_2	$K_2 = \frac{5.381}{\left(R_2/R_1 + 0.686\right)^{10.882}} + 1.979$	0.98
	4.7	K_3	$K_3 = \frac{5.426}{\left(R_3/R_1 + 0.748\right)^{8.232}} + 2.263$	0.94
	4.8	K_4	$K_4 = \frac{5.777}{\left(R_4/R_1 + 0.706\right)^{11.25}} + 0.878$	0.98
25 mm	4.9	K_2	$K_2 = \frac{14.801}{\left(R_2/R_1 - 0.0714\right)^{0.705}} - 18.598$	0.91
	4.10	K_3	$K_3 = \frac{47.063}{\left(R_3/R_1 + 0.861\right)^{11.329}} + 6.789$	0.86
	4.11	K_4	$K_4 = \frac{3.342}{\left(R_4/R_1 - 0.123\right)^{1.210}} + 0.925$	0.99

32 mm	4.12	K_2	$K_2 = \frac{10.932}{\left(R_2/R_1 - 0.072\right)^{0.999}} + 4.031$	0.98
	4.13	K_3	$K_3 = \frac{1.689}{\left(R_3/R_1 + 0.466\right)^{7.349}} - 1.766$	0.74
	4.14	K_4	$K_4 = \frac{2.29}{\left(R_4/R_1 + 0.104\right)^{3.529}} + 19.967$	0.99

Los valores del coeficiente de determinación son mayores a 0.7, con lo que se confirma la bondad de los ajustes propuestos.

Integración de gráficas para K_2 , K_3 y K_4

Debido a la simetría que presentan los cruces estudiados y a la forma en que se relacionaron los valores de los coeficientes de pérdidas menores K de las salidas, con los números de Reynolds de cada una de ellas y el de entrada, se puede pensar que, si se superponen las gráficas para K_2 , K_3 y K_4 , los puntos deben seguir conservando tendencias similares. Es por eso que se integraron los datos experimentales en una sola gráfica para determinar una ecuación de ajuste que permita obtener el coeficiente de pérdida sin importar el diámetro.

Las Figuras 4.15 a 4.17 muestran los ajustes realizados para cada coeficiente de pérdida y la ecuación correspondiente se presenta en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Ecuaciones de ajuste para K_2 , K_3 y K_4 (Flujo dividido)

Diámetro	Figura	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R^2
19,25 y 32 mm	4.15	K_2	$K_2 = \frac{1.115}{\left(R_2/R_1\right)^{2.433}}$	0.71
19,25 y 32 mm	4.16	K_3	$K_3 = \frac{0.374}{\left(R_3/R_1 + 0.25\right)^{5.372}} + 1.451$	0.66
19,25 y 32 mm	4.17	K_4	$K_4 = \frac{0.711}{\left(R_4/R_1\right)^{2.922}}$	0.79

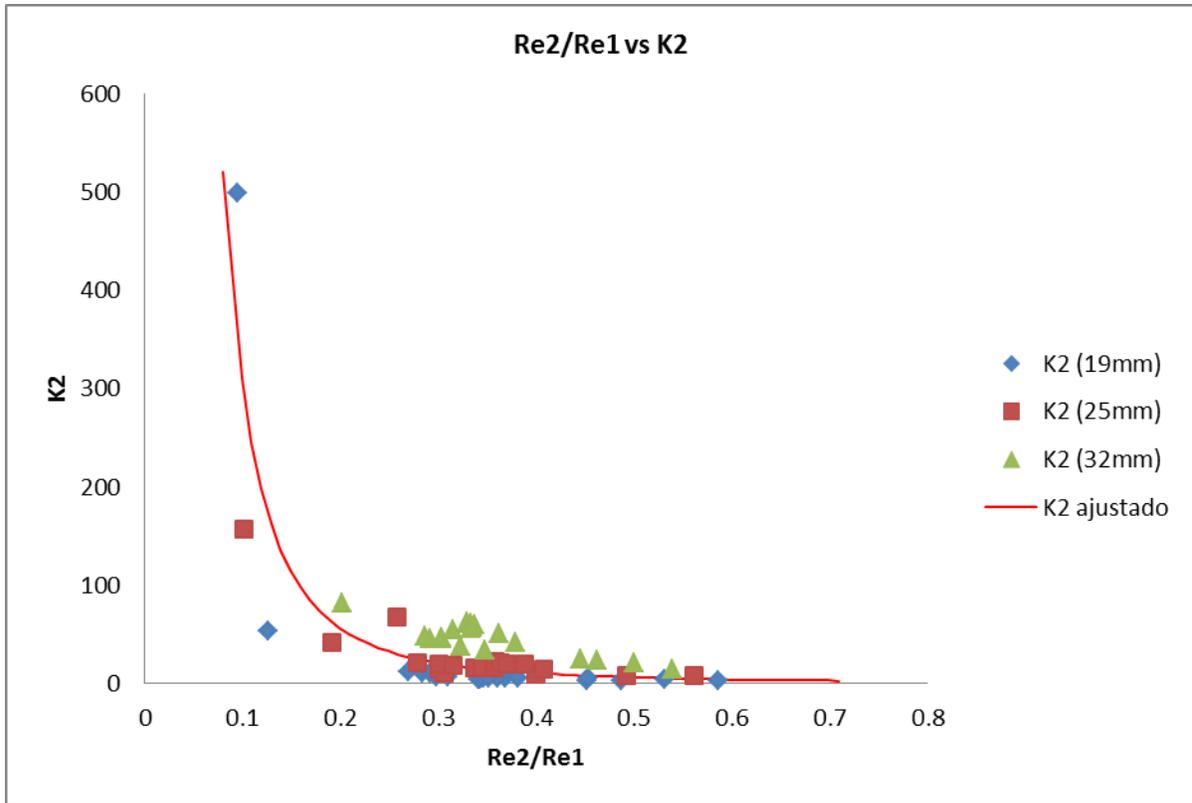


Figura 4.15 Gráficas de Re_2/Re_1 contra K_2 para los cruces de 19,25 y 32 mm

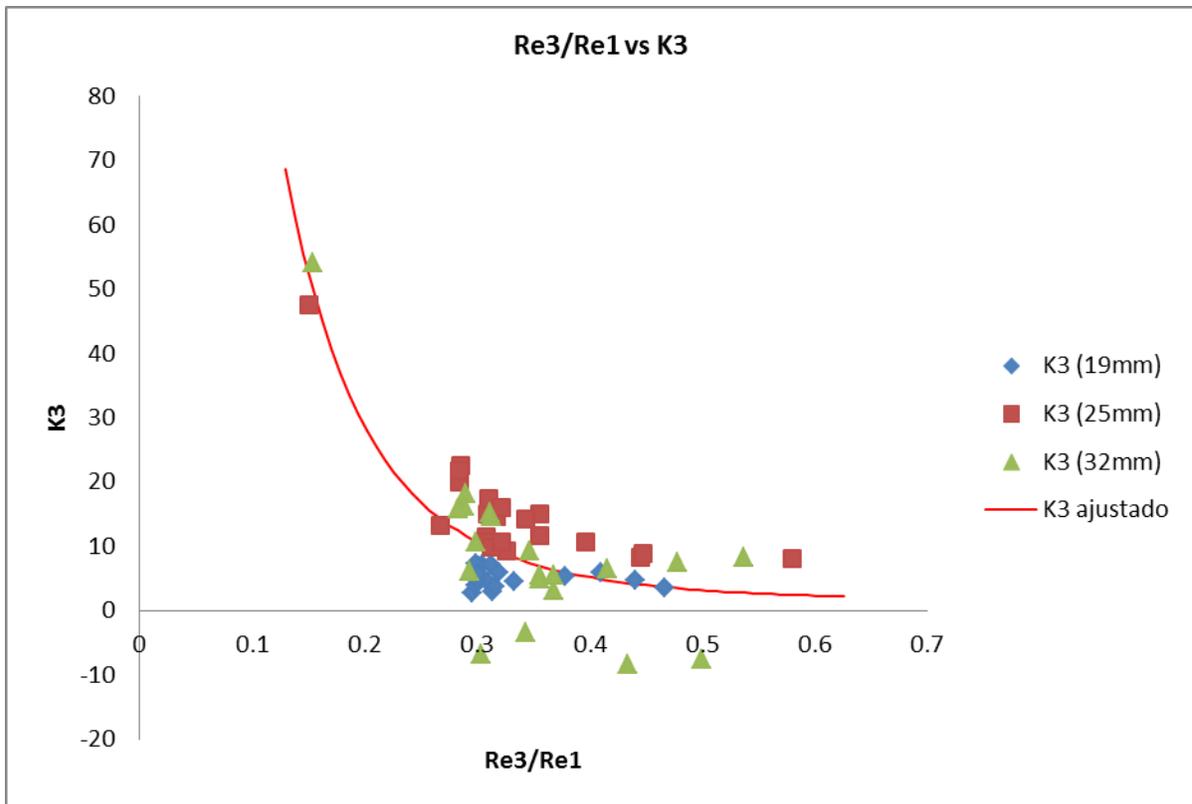


Figura 4.16 Gráficas de Re_3/Re_1 contra K_3 para cruces de 19, 25 y 32 mm

En este punto es importante señalar la presencia de valores negativos en los datos correspondientes al coeficiente K_3 del cruce de 32 mm (Figura 4.16). Dichos valores nos estarían indicando una ganancia de energía, lo cual no es físicamente posible, por lo que se considera que estos valores de deben a la ausencia del coeficiente de Coriolis (α) en los cálculos o por alguna falla en la etapa de medición.

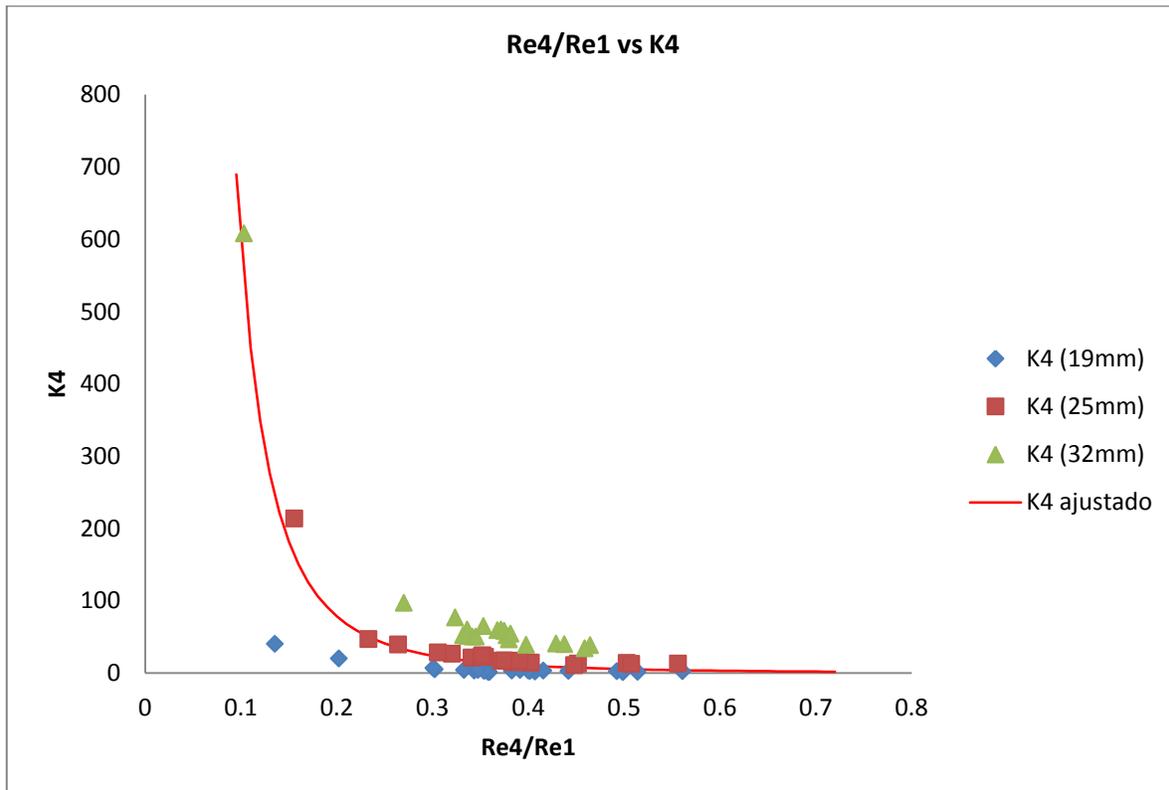


Figura 4.17 Gráficas de Re_4/Re_1 contra K_4 para cruces de 19, 25 y 32 mm

4.2.2 FLUJO PERPENDICULAR

En este caso existen dos flujos de entrada y dos flujos de salida. Se asumirá que las pérdidas menores se concentran en los tramos de salida 3 y 4, por lo que existirán dos coeficientes de pérdidas menores: K_3 y K_4 . Éstos pueden deducirse haciendo un balance de energía entre los puntos en qué se hicieron mediciones de presión en las entradas 1 y 2 (donde se conocen, por lo tanto, todos los valores de las diferentes cargas), y los puntos de interés en los tramos 3 y 4. El balance puede efectuarse iniciando en el tramo 1 ó en el 2, y llegar a ambas salidas.

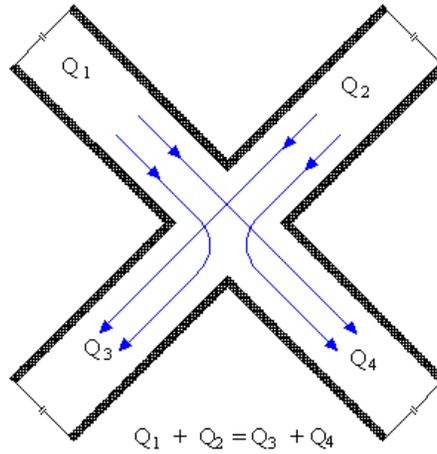


Figura 4.18 Flujo perpendicular

Expresiones para estimar K_3 :

Haciendo el balance de energía entre los puntos de los tramos 1 y 3 (Figura 4.18), se tiene que:

$$E_1 - h_{f1} - h_{f3} - h_{L3} = E_3 \tag{4.7}$$

Donde E_i representa el nivel de energía en el punto i ; h_{fi} son las pérdidas por fricción en el tramo comprendido entre el punto i y el centro del cruce; y h_{L3} son las pérdidas locales correspondientes al tramo que une al punto 3 con el centro del cruce. De la ecuación 4.7 se puede despejar K_3 :

$$K_{3\leftarrow 1} = \frac{(E_1 - E_3) - h_{f1} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \tag{4.8}$$

El subíndice $3\leftarrow 1$, indica que se trata del coeficiente de pérdidas del tramo 3, calculado a partir del balance con el tramo 1. Esta forma de marcar los coeficientes de pérdidas, es muy común para accesorios que implican algún tipo de unión o separación de varios flujos, como es el caso de tees, yeas, bifurcaciones y cruces, entre otros.

En este punto es necesario hacer un paréntesis para aclarar este aspecto: Intuitivamente se puede esperar que el coeficiente K sea único para cada tramo, dadas las condiciones de flujo y geometría, independiente del tramo desde el que se haga el balance de energía. Esto es teóricamente cierto, sobre todo si se tiene en cuenta que el nivel de energía en el centro del cruce que se obtiene partiendo desde el punto 1, no puede ser distinto al que

se obtendría partiendo desde cualquiera de los puntos 2, 3 ó 4. Sin embargo, como los cálculos parten de datos obtenidos en laboratorio, se puede esperar alguna diferencia en los resultados que los involucren.

Por ejemplo, Sharp (2009), solo estima el coeficiente de pérdida K desde alguno de los dos tramos de entrada, y lo relaciona con variables de éste. Ahora bien, para el caso de cruces alimentados por dos tramos, esto podría llevar a confusiones a la hora de decidir cuál sería el tramo de partida. Algo más adecuado consiste en calcular los coeficientes de pérdidas menores desde todos los tramos de entrada, promediarlos y reportarlo como K del tramo de salida estudiado. En este sentido está orientado el presente estudio.

De igual forma, y tal como se procedió desde el tramo 1, se hace balance de energía entre los puntos de los tramos 2 y 3:

$$E_2 - h_{f2} - h_{f3} - h_{L3} = E_3 \quad (4.9)$$

De donde:

$$K_{3\leftarrow 2} = \frac{(E_2 - E_3) - h_{f2} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \quad (4.10)$$

De modo que, finalmente:

$$K_3 = \frac{K_{3\leftarrow 1} + K_{3\leftarrow 2}}{2} \quad (4.11)$$

Expresiones para estimar K₄:

Procediendo como se hizo para el tramo 3, se obtendrían las siguientes expresiones:

$$K_{4\leftarrow 1} = \frac{(E_1 - E_4) - h_{f1} - h_{f4}}{V_4^2 / 2g} \quad (4.12)$$

$$K_{4\leftarrow 2} = \frac{(E_2 - E_4) - h_{f2} - h_{f4}}{V_4^2 / 2g} \quad (4.13)$$

De tal forma que:

$$K_4 = \frac{K_{4\leftarrow 1} + K_{4\leftarrow 2}}{2} \quad (4.14)$$

ANÁLISIS

En este caso de análisis se graficaron K_3 y K_4 contra sus respectivos Re_3 y Re_4 , para cada diámetro estudiado; sin embargo, se detectó gran dispersión en la relación de Re_3 y K_3 , por lo que sólo se presenta las relaciones encontradas entre los coeficientes K_4 y Re_4 .

Las Figuras 4.19 y 4.20 son dos ejemplos de las relaciones entre Re_3 y K_3 que presentan gran dispersión.

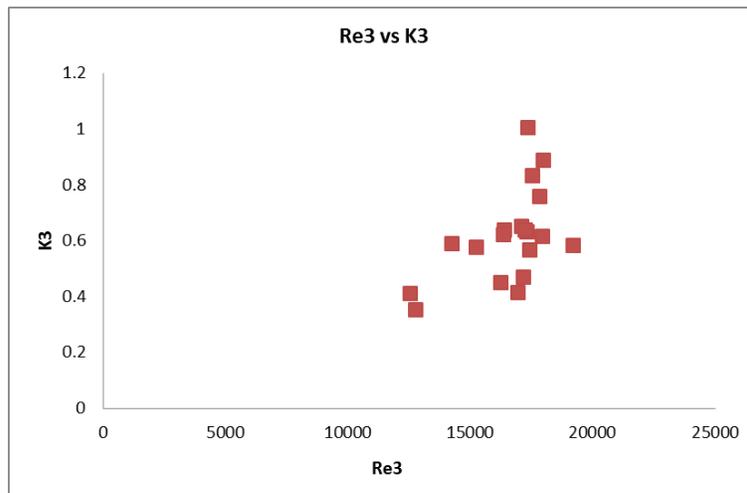


Figura 4.19 Gráfica de Re_3 contra K_3 para el cruce de 25 mm

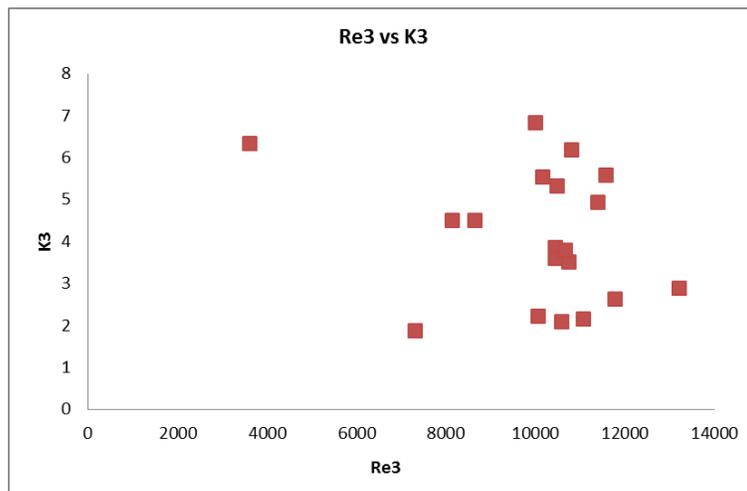


Figura 4.20 Gráfica de Re_3 contra K_3 para el cruce de 38 mm

Las Figuras 4.21 a 4.25 muestran las relaciones encontradas entre Re_4 y K_4 , las cuales presentan una dispersión de los datos aceptable.

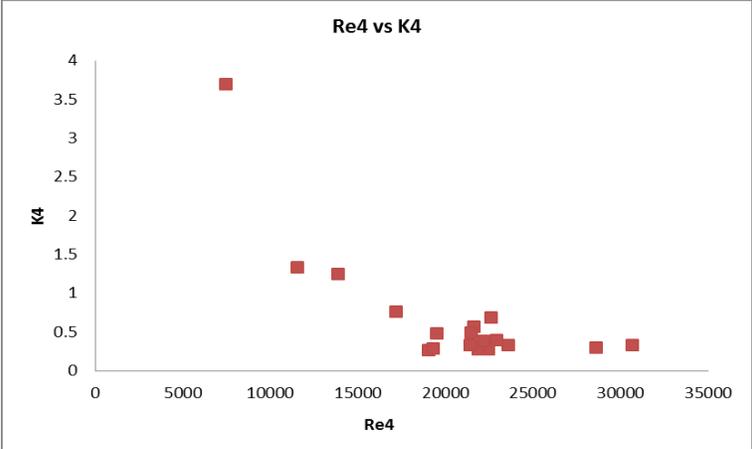


Figura 4.21 Gráfica de Re contra K para el cruce de 13 mm

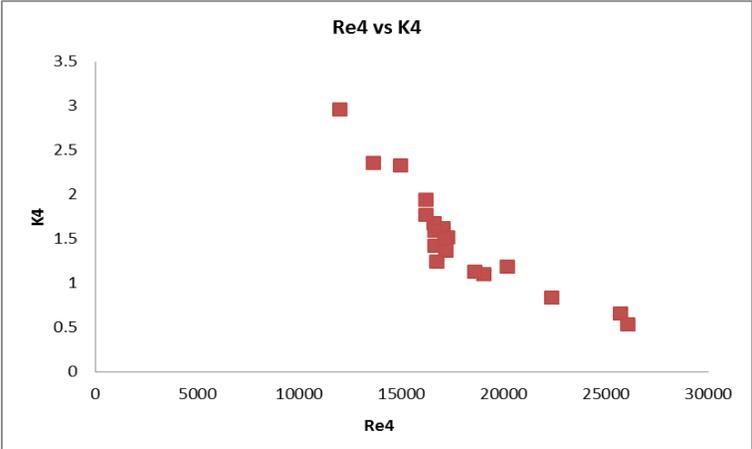


Figura 4.22 Gráfica de Re contra K para el cruce de 19 mm

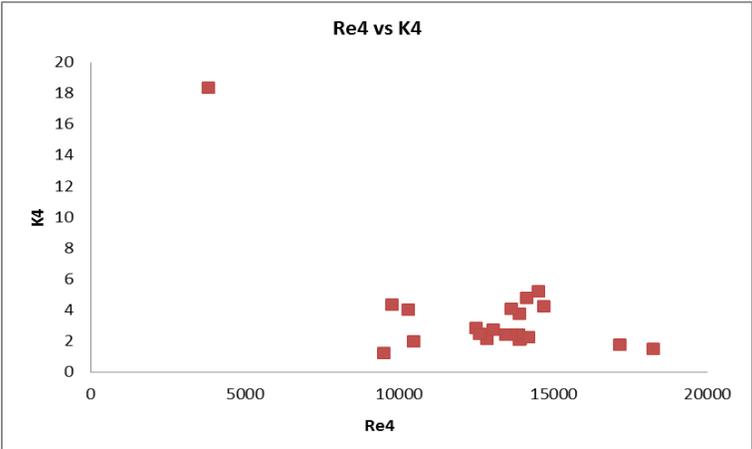


Figura 4.23 Gráfica de Re contra K para el cruce de 25 mm

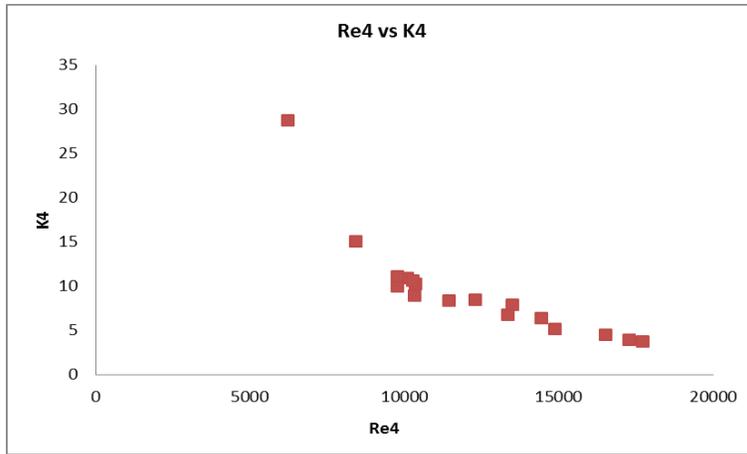


Figura 4.24 Gráfica de Re contra K para el cruce de 32 mm

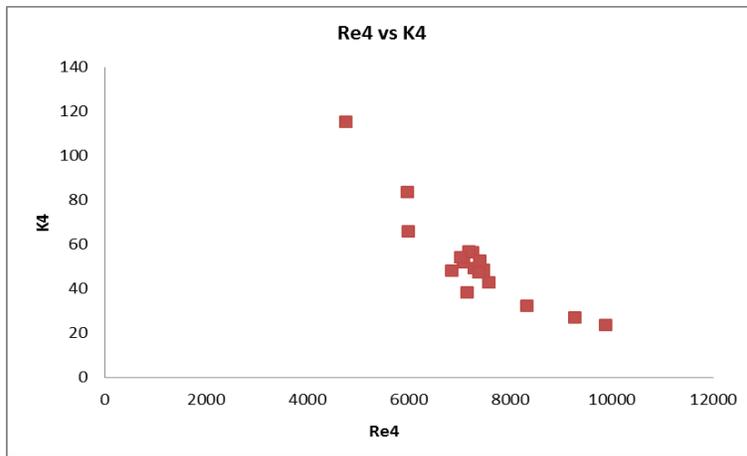


Figura 4.25 Gráfica de Re contra K para el cruce de 50 mm

Como paso siguiente en el análisis, y como se hizo para el caso de flujo dividido, se muestran las gráficas que relacionan Re_{sal}/Re_{ent} contra los coeficientes de pérdida. En este caso sólo se muestran las gráficas para Re_4/Re_2 vs K_4 .

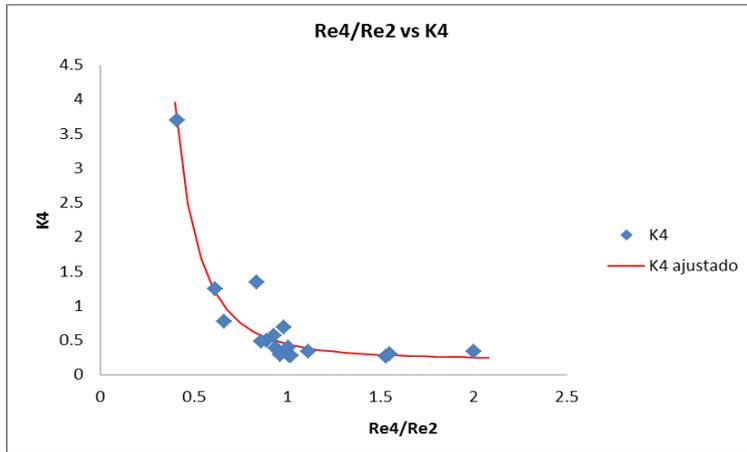


Figura 4.26 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 13 mm

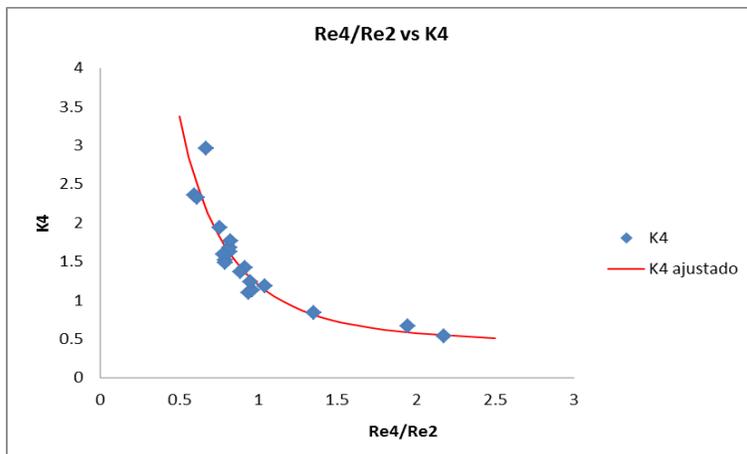


Figura 4.27 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19 mm

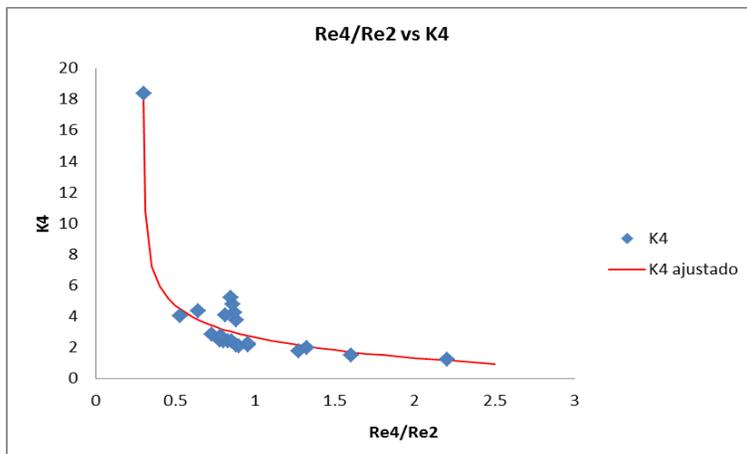


Figura 4.28 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25 mm

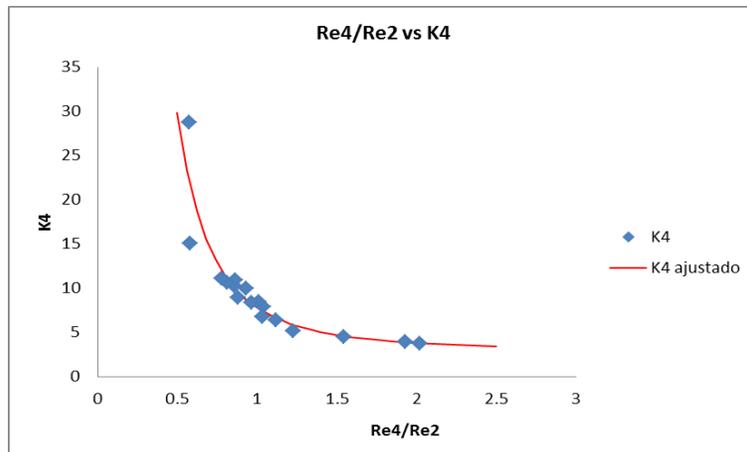


Figura 4.29 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32 mm

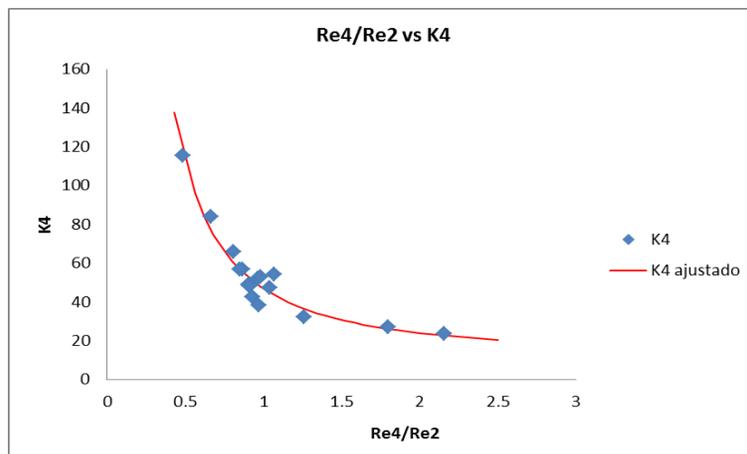


Figura 4.30 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50 mm

ECUACIONES DE AJUSTE

La tabla 4.3 muestra las ecuaciones de ajuste encontradas para cada diámetro. Cada ecuación presentó un coeficiente de determinación mayor a 0.8 por lo que se consideran ajustes aceptables.

Tabla 4.3 Ecuaciones de ajuste para Flujo perpendicular

Diámetro	Figura	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R ²
13 mm	4.26	K ₄	$K_4 = \frac{0.215}{\left(\frac{R_4}{R_2}\right)^{3.113}} + 0.229$	0.93
19 mm	4.27	K ₄	$K_4 = \frac{2.496}{\left(\frac{R_4}{R_2} + 0.45\right)^{3.176}} + 0.431$	0.85
25 mm	4.28	K ₄	$K_4 = \frac{2.190}{\left(\frac{R_4}{R_2} - 0.282\right)^{0.544}}$	0.93
32 mm	4.29	K ₄	$K_4 = \frac{4.920}{\left(\frac{R_4}{R_2}\right)^{2.453}} + 2.913$	0.82
50 mm	4.30	K ₄	$K_4 = \frac{35.482}{\left(\frac{R_4}{R_2}\right)^{1.502}} + 11.547$	0.93

Integración de gráficas para K₄

En esta sección se pretende integrar las diferentes expresiones encontradas para determinar el coeficiente K₄. La Figura 4.31 muestra todos los datos involucrados en las expresiones de la Tabla 4.3.

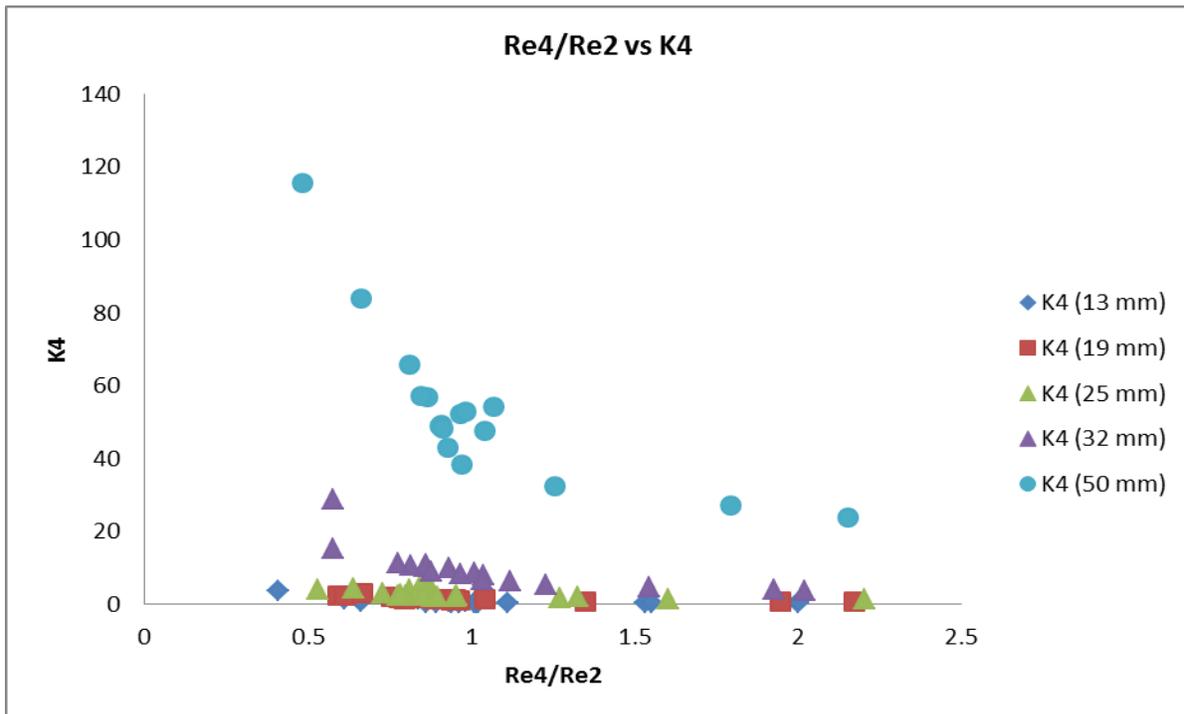


Figura 4.31 Gráfica de Re₄/Re₂ contra K₄ para cruces de 13, 19, 25, 32 y 50 mm

Podemos observar que los datos del cruce de 50 y 32 mm de diámetro no se relacionan directamente con el resto, por lo que se propone una ecuación de ajuste que integre solo los datos correspondientes a los diámetros de 13, 19 y 25 mm. Dicha ecuación de ajuste se muestra en la Figura 4.32 y su forma se presenta en la Tabla 4.4, aun cuando presenta un coeficiente de determinación un poco bajo debido a la dispersión de los datos.

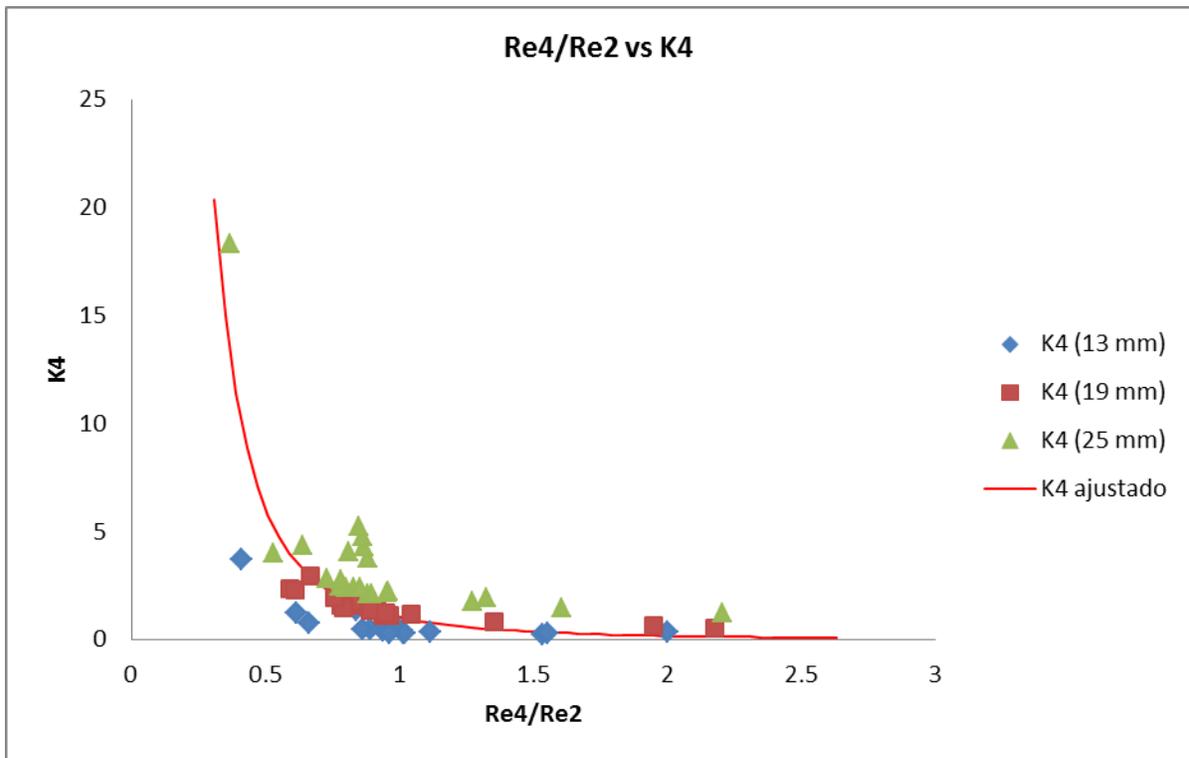


Figura 4.32 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para cruces de 13, 19 y 25 mm

Tabla 4.4 Ecuación de ajuste para K_4 (Flujo Perpendicular)

Diámetro	Figura	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R^2
13,19 y 25 mm	4.32	K_4	$K_4 = \frac{1.044}{\left(\frac{R_4}{R_2}\right)^{2.538}}$	0.60

4.2.3 FLUJO ENCONTRADO

Este caso supone el choque de dos flujos que entran por ramales opuestos y salen por los ramales restantes, como se muestra en la Figura 4.33, por lo que las ecuaciones para obtener los coeficientes de pérdida K son similares a las señaladas en el apartado Flujo perpendicular. A continuación se enlistan las expresiones con la nomenclatura correspondiente.

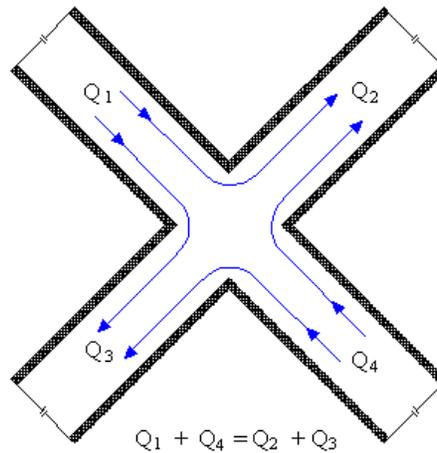


Figura 4.33 Flujo encontrado

Expresiones para estimar K3:

Haciendo el balance de energía entre los puntos de los tramos 1 y 3 (Figura 4.33), se tiene que:

$$E_1 - h_{f1} - h_{f3} - h_{L3} = E_3 \quad (4.15)$$

De la ecuación anterior se despeja K_3 , que corresponde al coeficiente de pérdida del tramo 3, calculado a partir del balance hecho desde el tramo 1:

$$K_{3\leftarrow 1} = \frac{(E_1 - E_3) - h_{f1} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \quad (4.16)$$

De igual forma, y tal como se procedió desde el tramo 1, se hace balance de energía entre los puntos de los tramos 4 y 3:

$$E_4 - h_{f4} - h_{f3} - h_{L3} = E_3 \quad (4.17)$$

De donde:

$$K_{3\leftarrow 4} = \frac{(E_4 - E_3) - h_{f4} - h_{f3}}{V_3^2 / 2g} \quad (4.18)$$

De modo que, finalmente:

$$K_3 = \frac{K_{3\leftarrow 1} + K_{3\leftarrow 4}}{2} \quad (4.19)$$

Expresiones para estimar K_2 :

Procediendo como se hizo para el tramo 3, se obtendrían las siguientes expresiones:

$$K_{2\leftarrow 1} = \frac{(E_1 - E_2) - h_{f1} - h_{f2}}{V_2^2 / 2g} \quad (4.20)$$

$$K_{2\leftarrow 4} = \frac{(E_4 - E_2) - h_{f4} - h_{f2}}{V_2^2 / 2g} \quad (4.21)$$

De tal forma que:

$$K_2 = \frac{K_{2\leftarrow 1} + K_{2\leftarrow 4}}{2} \quad (4.22)$$

ANÁLISIS

De igual forma que en el caso de flujo dividido, el primer paso consistió en observar el comportamiento de los coeficientes de pérdida K_i con el número de Reynolds de cada uno de los tramos de salida (3 y 4) y posteriormente se presentan las gráficas que relacionan los coeficientes con la combinación del número de Reynolds de un tramo de entrada y otro de salida.

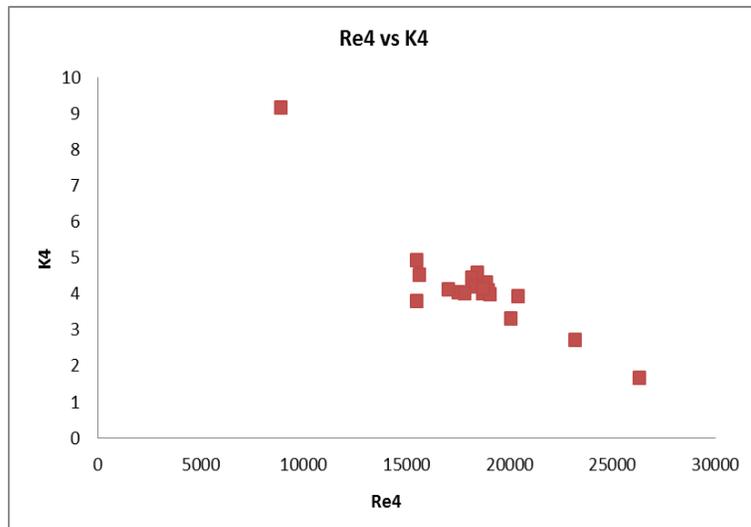
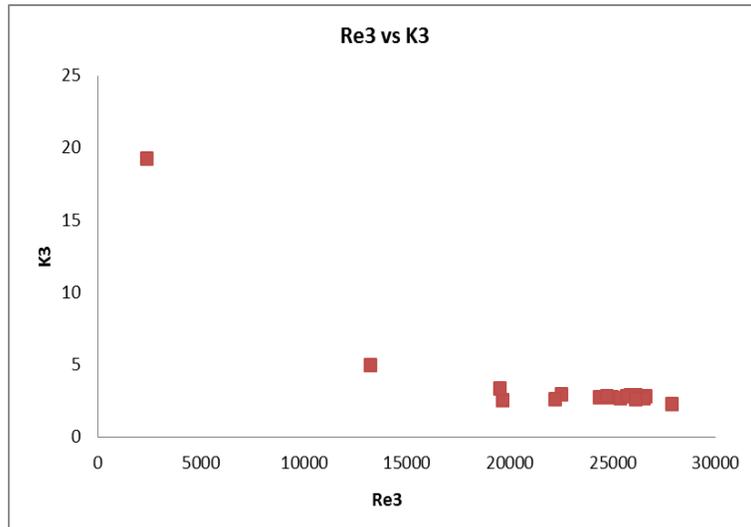


Figura 4.34 Gráficas de Re contra K para el cruce de 13mm

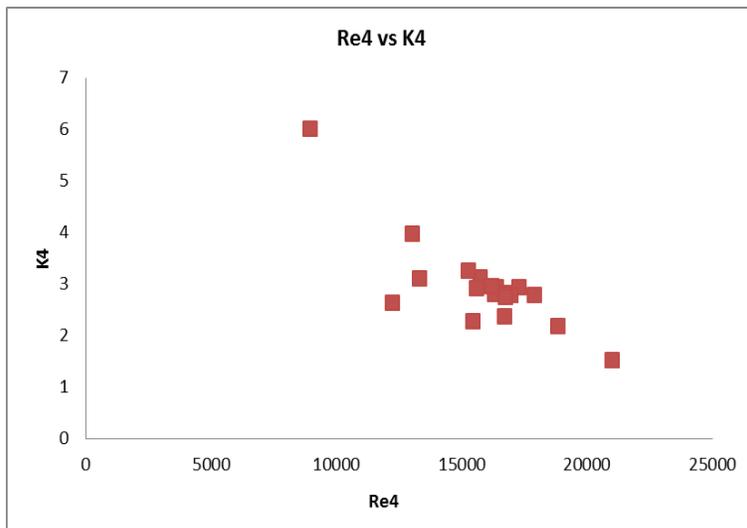
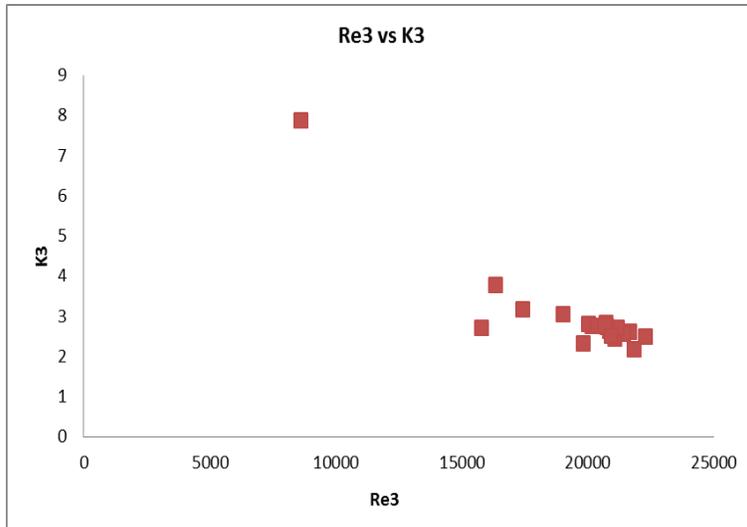


Figura 4.35 Gráficas de Re contra K para el cruce de 19mm

Para el caso del cruce de 25 mm de diámetro se presentó una gran dispersión de los puntos, lo cual se puede observar en la Fig. 4.36

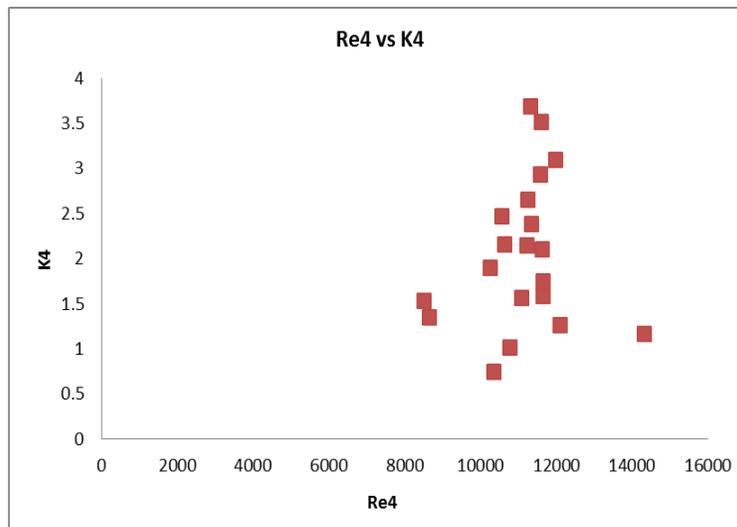
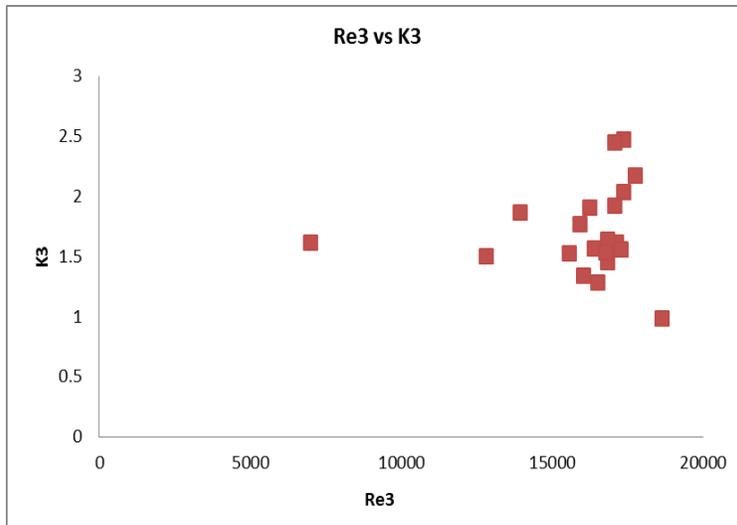


Figura 4.36 Gráficas de Re contra K para el cruce de 25mm

Para el caso de los cruces de 32mm y 38 mm no se observó una tendencia clara al relacionar el número de Reynolds en el tramo 3.

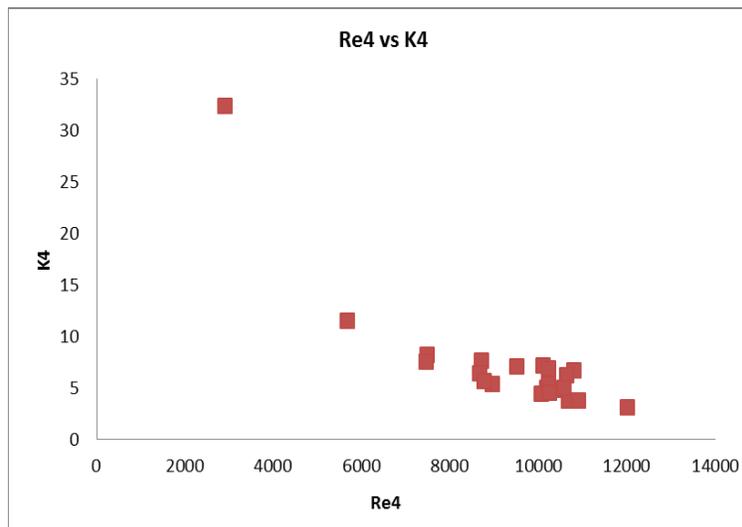
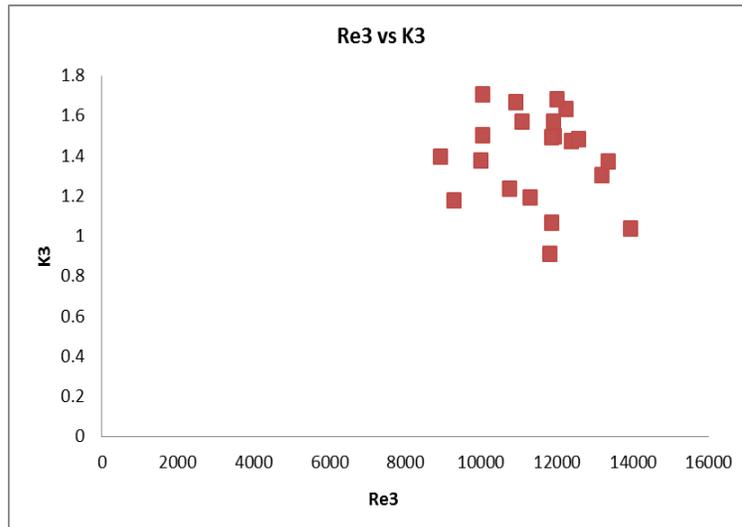


Figura 4.37 Gráficas de Re contra K para el cruce de 32mm

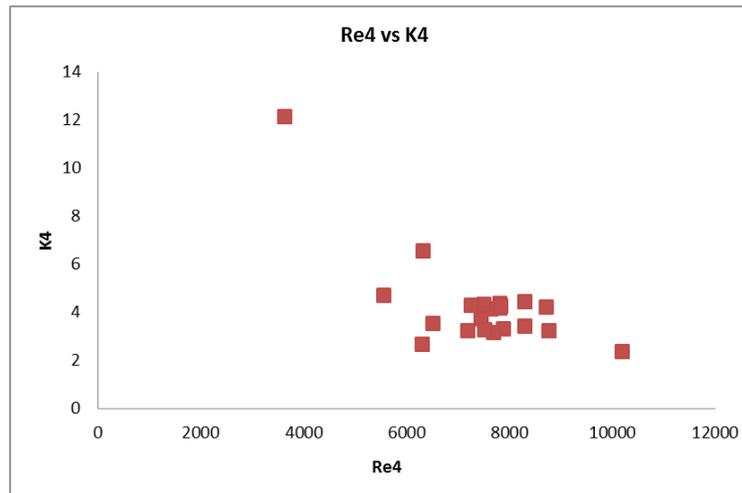
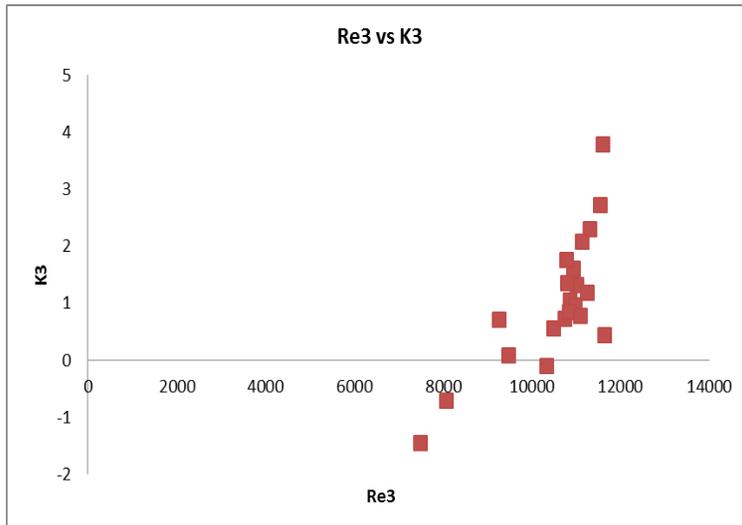


Figura 4.38 Gráficas de Re contra K para el cruce de 38mm

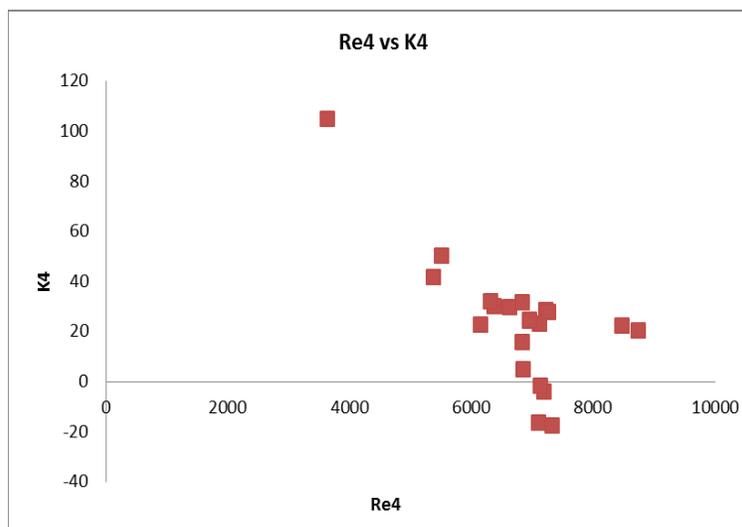
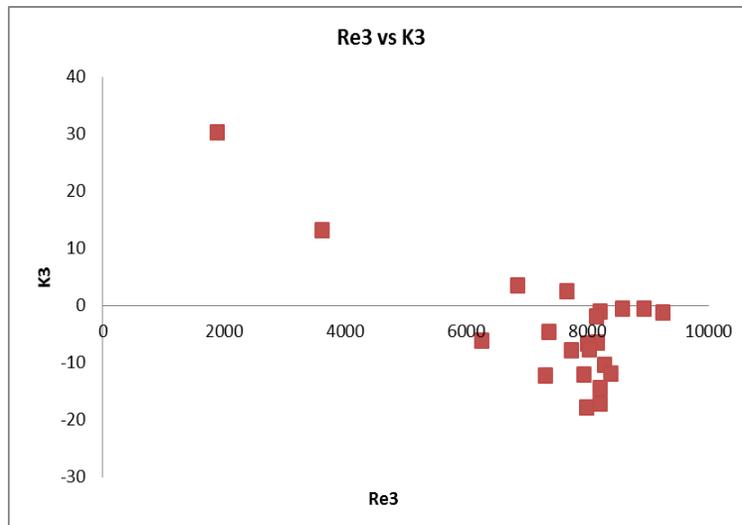


Figura 4.39 Gráficas de Re contra K para el cruce de 50mm

Aun cuando la relación individual de los Re_i con los K_i , fuera independiente de las posibles combinaciones de entrada, se encontró que al hacer una relación entre un Re de salida, con uno de entrada, y graficarla contra los coeficientes de pérdidas, la nube de puntos presentaba una mejor tendencia, por lo que a continuación se presentan las relaciones mencionadas y sus líneas de tendencia correspondientes.

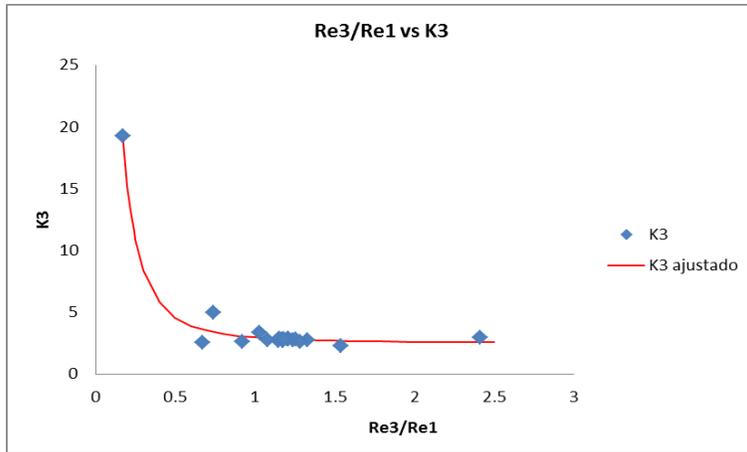


Figura 4.40 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 13mm

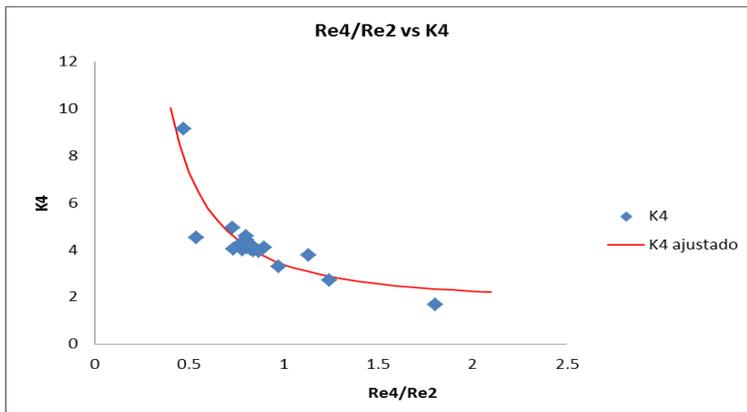


Figura 4.41 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 13mm

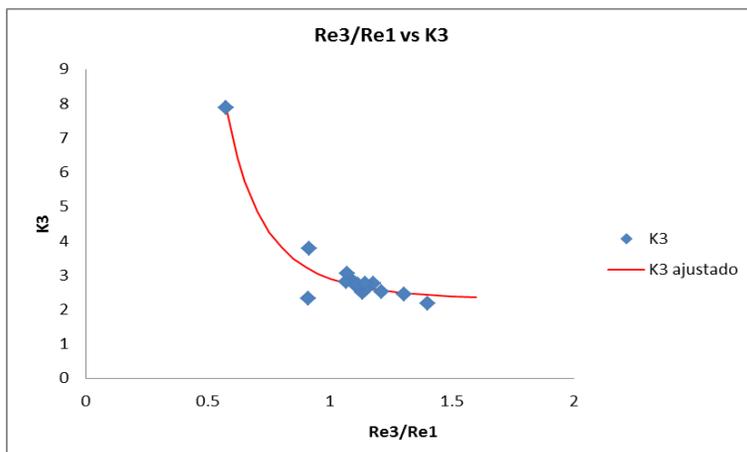


Figura 4.42 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para el cruce de 19mm

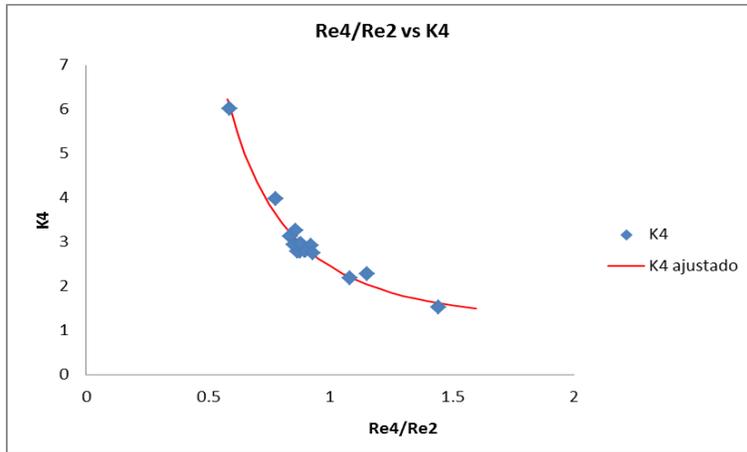


Figura 4.43 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 19mm

Para el caso de los cruce de 25 mm, 32mm, 38mm y 50mm los datos presentan gran dispersión, por lo que solo se pudo determinar una línea de tendencia para el coeficiente K_4 . Las Figuras 4.44 a 4.47 presentan dichos ajustes.

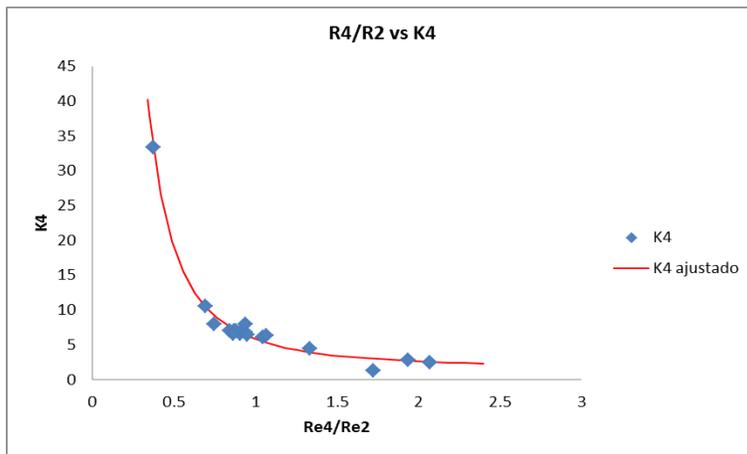


Figura 4.44 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 25 mm

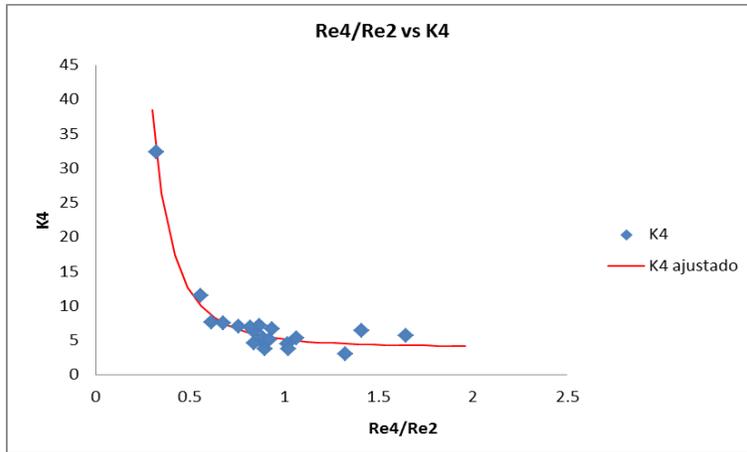


Figura 4.45 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 32mm

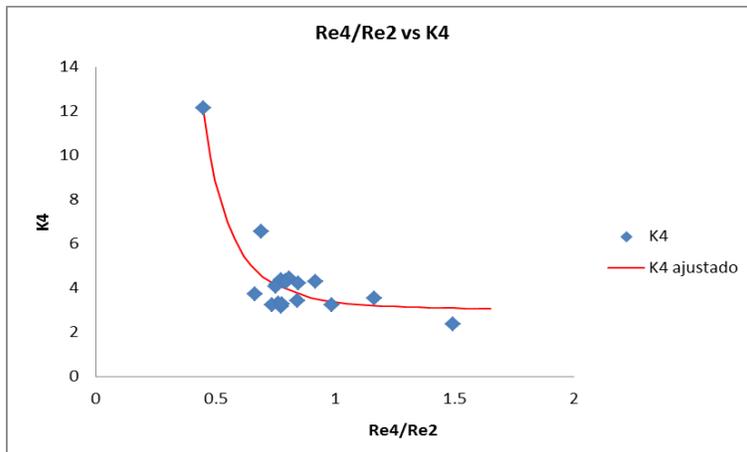


Figura 4.46 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 38mm

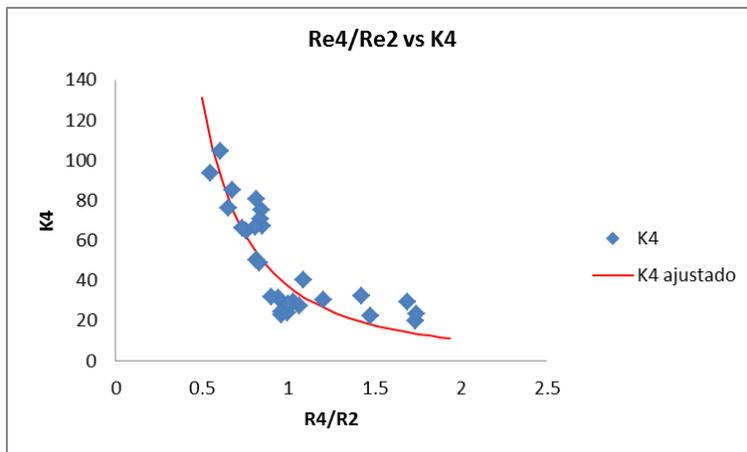


Figura 4.47 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para el cruce de 50mm

ECUACIONES DE AJUSTE

De igual forma que en los casos anteriores, en la Tabla 4.5 se resumen las ecuaciones de ajuste determinadas para el caso donde se presenta flujo encontrado.

Tabla 4.5 Ecuaciones de ajuste para Flujo Encontrado

Diámetro	Figura	Coficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R ²
13 mm	4.40	K ₃	$K_3 = \frac{0.512}{\left(R_3/R_1 + 0.069\right)^{2.444} + 2.538}$	0.98
	4.41	K ₄	$K_4 = \frac{1.603}{\left(R_4/R_2\right)^{1.789} + 1.789}$	0.77
19 mm	4.42	K ₃	$K_3 = \frac{0.656}{\left(R_3/R_1\right)^{3.881} + 2.254}$	0.95
	4.43	K ₄	$K_4 = \frac{1.429}{\left(R_4/R_2\right)^{2.375} + 1.022}$	0.97
25 mm	4.44	K ₄	$K_4 = \frac{4.237}{\left(R_4/R_2\right)^{2.048} + 1.614}$	0.98
32 mm	4.45	K ₄	$K_4 = \frac{1.160}{\left(R_4/R_2\right)^{2.818} + 4.004}$	0.96
38 mm	4.46	K ₄	$K_4 = \frac{0.346}{\left(R_4/R_2\right)^{4.083} + 3.029}$	0.86
50 mm	4.47	K ₄	$K_4 = \frac{37.278}{\left(R_4/R_2\right)^{1.818}}$	0.75

Integración de gráficas para K₃ y K₄

En este análisis, los diámetros que presentaron datos con una tendencia definida para el coeficiente K₃, fueron los de 13 y 19 mm. La Figura 4.48 integra dichos datos y muestra la línea de tendencia encontrada. De igual forma, para el caso del coeficiente K₄, la Figura 4.49 muestra la integración de todos los datos (13, 19, 25, 32 y 38 mm) para determinar una línea de tendencia única.

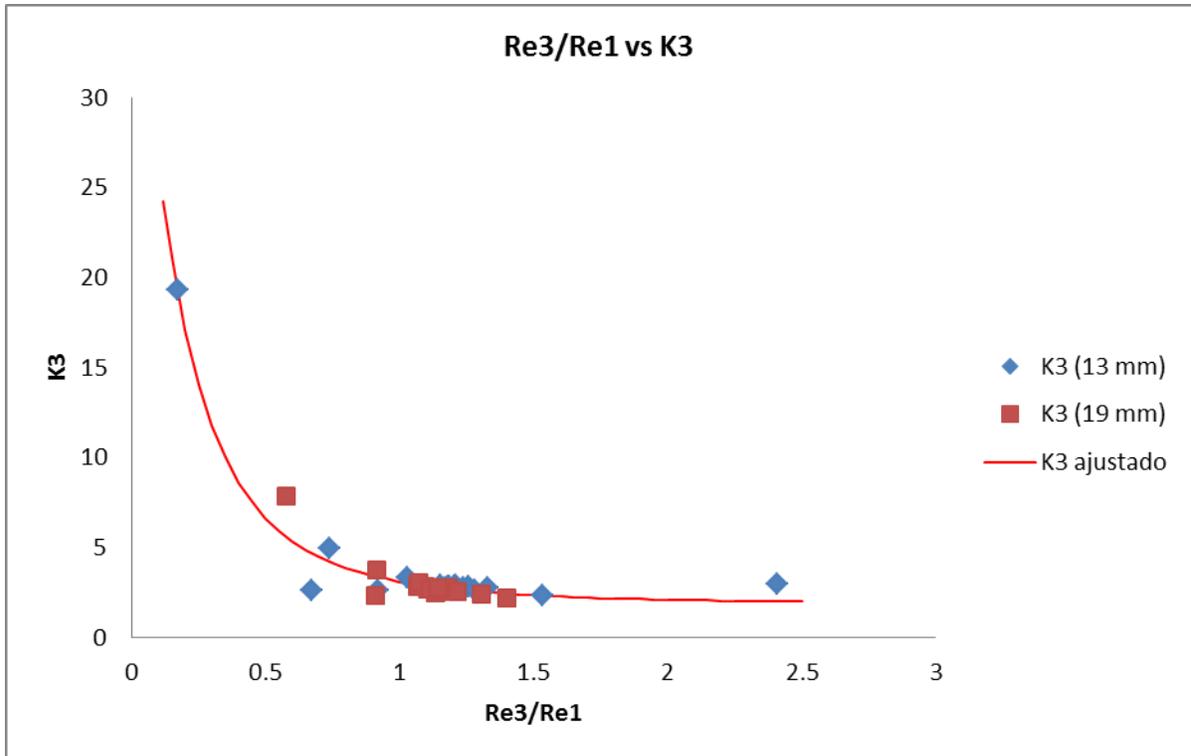


Figura 4.48 Gráfica de Re_3/Re_1 contra K_3 para los cruces de 13 y 19 mm

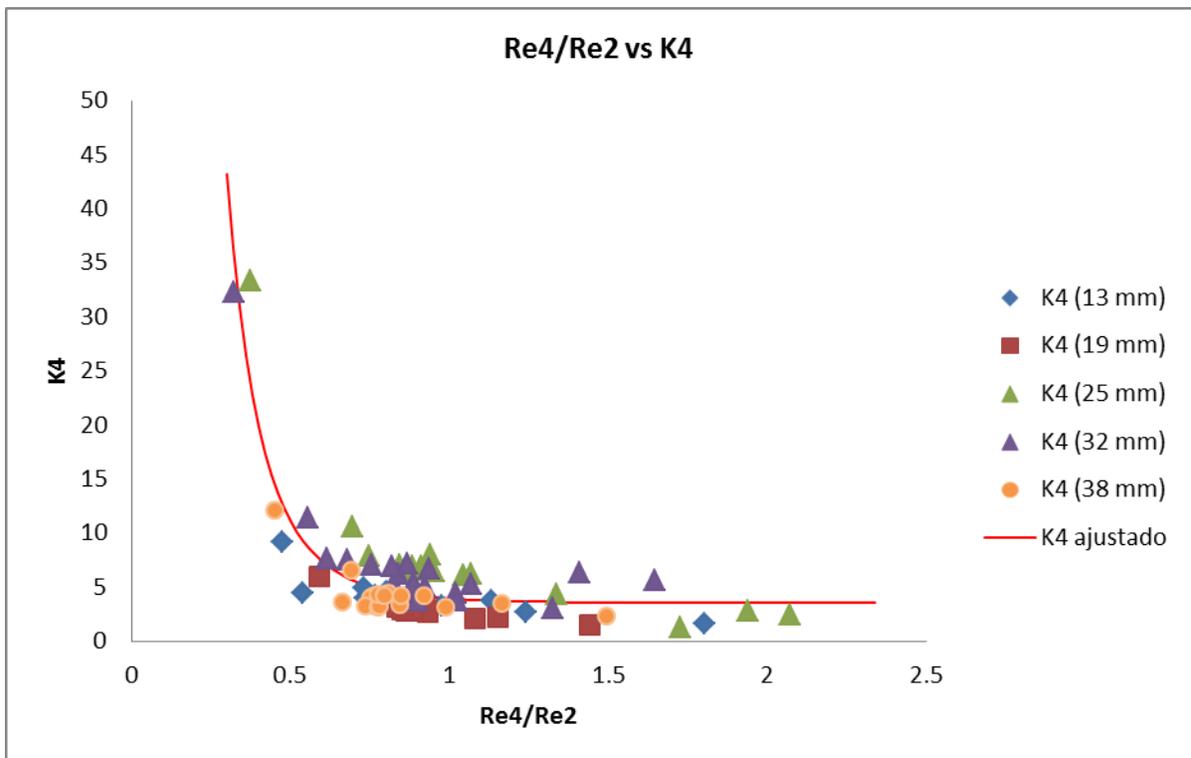


Figura 4.49 Gráfica de Re_4/Re_2 contra K_4 para los cruces de 13, 19, 25, 32 y 38 mm

Las ecuaciones de ajuste de las gráficas anteriores se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Ecuaciones de ajuste para K_3 y K_4 (Flujo encontrado)

Diámetro	Figura	Coefficiente de pérdida	Ecuación de ajuste	R²
13 y 19 mm	4.48	K_3	$K_3 = \frac{6.083}{\left(\frac{R_3}{R_1} + 0.572\right)^{3.541}} + 1.891$	0.95
13, 19, 25, 32 y 38 mm	4.49	K_4	$K_4 = \frac{2.338}{\left(\frac{R_4}{R_2} + 0.319\right)^{5.914}} + 3.546$	0.80

CONCLUSIONES

Como el estado del arte en lo referente a las pérdidas locales en cruces se consideró insuficiente, se llevó a cabo un trabajo de laboratorio y un análisis numérico de los resultados. La investigación experimental se hizo para cruces de tuberías con diámetros nominales de $\frac{1}{2}$ " (13mm), $\frac{3}{4}$ " (19mm), 1" (25mm), 1 $\frac{1}{4}$ " (32mm), 1 $\frac{1}{2}$ " (38mm) y 2" (50 mm); para tres posibles patrones de flujo (flujo dividido flujo perpendicular y flujo encontrado)

Se determinó que el gasto y el diámetro influyen en la magnitud de los coeficientes de pérdida local, por lo que se utilizó un parámetro adimensional que involucrara dichos elementos de cálculo, para encontrar una relación entre este y los coeficientes encontrados, escogiendo el número de Reynolds. La estimación del coeficiente de pérdida local en algunos casos de cruces resulta ser adecuada con una ecuación de potencia.

Se obtuvieron expresiones matemáticas para determinar la magnitud del coeficiente de pérdida local para los cruces de tuberías con un coeficiente de determinación aceptable. Para lo cual, se asignó un coeficiente de pérdida (K) para cada tramo de salida; es decir, para los patrones de flujo que consisten en una sola entrada de flujo, se asignaron tres coeficientes, y en el caso del flujo perpendicular y encontrado solo se asignaron dos coeficientes, los cuales se determinaron a partir de un balance de energía entre un tramo de salida y uno de entrada. En el caso del flujo dividido, se tiene un coeficiente para cada tramo de salida, todos relacionados con el de la única entrada. Por otro lado, en el caso de los patrones de flujo con 2 salidas, la determinación del coeficiente se logró haciendo un balance de energía promediando los valores para K obtenidos del balance entre las dos entradas y el tramo de salida en cuestión.

No se pudo generalizar una expresión en términos del diámetro, solamente se logró para algunos diámetros dependiendo del patrón de flujo que se haya analizado.

Para futuras investigaciones en el área, podrían considerarse cruces de tuberías de materiales diferentes al PVC, con variaciones en el diámetro de cada uno de los ramales del cruce. También sería importante generar expresiones para diámetros mayores y para una gama amplia de materiales, así como analizar el caso en el que el cruce es alimentado por tres tramos. Además, podría verificarse si las expresiones encontradas pueden utilizarse si el cruce recibe mayores gastos a los utilizados en el laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Redes de distribución. México.

Gerhart, P. M., Gross, R. J. and Hochstein J. I.,(1992). Fundamentals of Fluid Mechanics. Second edition, Addison-Wesley Publishing Company, United States of America.

Mataix C., (1982). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. Ediciones del Castillo S. A., México.

Meneses A. E.,(2012). Algunos aspectos del cálculo de redes y su aplicación a un caso real. Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Munson B. R., et al. (1994), Fundamentals of fluid mechanics, John Wiley & Sons, Inc.

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

Pérez G. R., (1993). Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

Sharp, Z. B., 2009. Energy Losses in Cross Junctions, Logan Utah: Utah State University.

Sotelo A.G., (1999) Hidráulica General, Volumen 1, Noriega Editores, México.

Tolentino G. K. I., (2013). Pérdidas de energía en cruces de tuberías Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

White, F. M., (1994). Fluid Mechanics. Third edition, McGraw-Hill, United States of America.