

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil



**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN
ACCESORIOS DE POLIPROPILENO, CONSIDERANDO CAUDAL
VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO**

POR:

IGNACIO ALEJANDRO OYARZO AZÓCAR

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

ABRIL, 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN
ACCESORIOS DE POLIPROPILENO, CONSIDERANDO CAUDAL
VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO**

POR:

IGNACIO ALEJANDRO OYARZO AZÓCAR

VO. BO.

COMITÉ DE REVISIÓN

Dr. Ricardo Cavazos González

Director de tesis

Dr. José Luis Bruster Flores
Codirector de tesis

Dr. Andrés García Ruiz
Asesor externo



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/02/18

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,


Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN ACCESORIOS DE POLIPROPILENO CONSIDERANDO CAUDAL VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO", que presenta el ING. IGNACIO ALEJANDRO OYARZO AZÓCAR, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


Dr. Ricardo Alberto Cavazos González



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/03/06

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es "**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN ACCESORIOS DE POLIPROPILENO CONSIDERANDO CAUDAL VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO**", que presenta el **ING. IGNACIO ALEJANDRO OYARZO AZÓCAR**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. José Luis Bruster Flores
Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2026/02/18

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN ACCESORIOS DE POLIPROPILENO CONSIDERANDO CAUDAL VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO”**, que presenta el ING. IGNACIO ALEJANDRO OYARZO AZÓCAR, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ
Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: IGNACIO ALEJANDRO DYARZO AZÓCAR

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN ACCESORIOS DE POLIPROPILENO, CONSIDERANDO CAUDAL VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Ramongoria

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo



[Signature]
Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 12 de Marzo de 2020

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 3; Página 1 de 1

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil
Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación.

Los miembros del comité evaluador recomendamos que la Tesis titulada **“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDA MENOR EN ACCESORIOS DE POLIPROPILENO, CONSIDERANDO CAUDAL VARIABLE MEDIANTE UN BANCO HIDRÁULICO”**, realizada por el Ing. Ignacio Alejandro Oyarzo Azócar, con número de matrícula **2222254**, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de **Maestro en Ciencias** dentro del programa **Maestría en Ciencias Con Orientación en Ingeniería Ambiental**.

El Comité Evaluador:

Dr. Ricardo Cavazos González
Director de tesis

Dr. José Luis Bruster Flores
Evaluador 1 de la tesis

Dr. Héctor de León Gómez
Evaluador 2 de la tesis

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Abril, 2026.

Dedicatoria

A mis padres, Víctor Oyarzo Cárcamo y Liria Azócar Aguilar, por estar siempre a mi lado, apoyándome en todas mis decisiones y permitiéndome hacer mi propio camino, sin críticas ni exigencias, solo procurando que sea lo que me haga feliz. Sobran las palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanas, Cecilia, Fabiola, Alejandra, Dyonila y Victoria, por siempre estar presentes, por ser inspiración y ejemplo a seguir en mi vida.

A mis sobrinos, quienes dan alegría y sentido a nuestra familia.

A mi novia, Sara Álvarez, por ser el pilar fundamental de este proceso. Tu ayuda hizo todo más fácil. Gracias por tu compañía, paciencia y cariño. Gracias por siempre creer en mí.

A mis amigos, por las risas que me sacaron y por hacerme sentir su cercanía a pesar de la distancia.

Agradecimientos

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por impulsar la investigación científica y brindarme el apoyo económico durante todo el transcurso de la maestría.

A la **Facultad de Ingeniería Civil**, por darme la oportunidad de realizar mis estudios y desarrollar esta investigación.

Al **Dr. Ricardo Cavazos, Dr. José Luis Bruster y Dr. Andrés García**, por su valiosa contribución en este proyecto. Gracias por su tiempo, atención y disposición durante estos dos años.

Al **Dr. Héctor de León** y al **Dr. Jorge Abreu**, por su apoyo tanto en mi investigación como en lo personal.

Al **departamento de Hidráulica**, por facilitar los equipos y el espacio para llevar a cabo este proyecto.

A **Nachito, Kililo, Hugo, César, Huanquiao y Brandon**, por tantos años de amistad.

A **Luis Arista**, por tantas conversaciones y risas compartidas durante estos dos años.

A todos mis compañeros del posgrado, por crear un ambiente agradable y ameno.

A todos los trabajadores del Instituto de Ingeniería Civil, por su buena disposición y constante apoyo.

Índice de contenido

1. Capítulo 1: Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Problemática.....	12
1.4. Justificación	14
1.5. Hipótesis.....	16
1.6. Objetivos.....	16
2. Capítulo 2: Marco teórico	18
2.1. Propiedades de fluidos	18
2.2. Presión	20
2.3. Ecuación de continuidad.....	21
2.4. Conservación de energía.....	22
2.5. Ecuación de Bernoulli (Ecuación de energía).....	22
2.6. Ecuación general de energía.....	23
2.7. Pérdidas de carga	23
2.8. Coeficiente de resistencia o de pérdida menor.....	27
3. Capítulo 3: Método	28
3.1. Diseño del sistema hidráulico de medición.....	29
3.2. Presupuesto del sistema hidráulico	40
3.3. Construcción del sistema hidráulico	44
3.4. Fase experimental	51
4. Capítulo 4: Resultados y discusiones	55
4.1. Ramal 1 y 2: Conjunto de codos y tramo longitudinal.....	56
4.2. Ramal 3: Accesorios objetivo.....	58
4.3. Ecuación del coeficiente de resistencia “K”	67
4.4. Comparación de valores del coeficiente de resistencia “K”	74
4.5. Implementación: Pérdidas de cargas locales	76
Conclusiones y recomendaciones	82
Conclusiones	82
Recomendaciones	84

Productos derivados de la investigación.....	85
Referencias bibliográficas consultadas	87
Anexos	90
Anexo A: Primera tanda de medición ramal 3.....	90
Anexo B: Segunda tanda de medición ramal 3.....	92
Anexo C: Probabilidades acumuladas en la distribución normal estándar	94
Anexo D: Tabla de intervalo de confianza para codo 90°	95
Anexo E: Tabla de intervalo de confianza para codo 45°	102

Índice de figuras

<i>Figura 1. Coeficientes de pérdidas menores “K” para accesorios de tuberías estipulado por Cengel y Cimbala [4]</i>	4
<i>Figura 2. Coeficientes de pérdidas menores “K” según tipo de accesorio y diámetro nominal de tubería especificado por Sotelo [9].</i>	5
<i>Figura 3. Representación de "K" en función del flujo según Flores y Brito (2018) [10]</i>	6
<i>Figura 4. Representación de accesorio de cambio de dirección [16].</i>	9
<i>Figura 5. Diagrama del método de la investigación. Elaboración propia.</i>	29
<i>Figura 6. Diagrama del diseño del sistema hidráulico. Elaboración propia.</i>	30
<i>Figura 7. Variación del esfuerzo de corte de la pared sobre el fluido [5].</i>	34
<i>Figura 8. Sistema de medición hidráulica. Vista en planta. Elaboración propia.</i> 37	
<i>Figura 9. Estructura de madera. Vista en isométrico. Elaboración propia.</i>	39
<i>Figura 10. Representación final del sistema de medición de pérdidas menores. Elaboración propia.</i>	40
<i>Figura 11. Diagrama de la construcción del sistema hidráulico. Elaboración propia.</i>	45
<i>Figura 12. Limpieza del banco Hidráulico.</i>	46
<i>Figura 13. Compra de materiales.</i>	46
<i>Figura 14. Construcción de la estructura soportante.</i>	47
<i>Figura 15. Unión de tuberías y accesorios.</i>	48
<i>Figura 16. Elaboración de los puntos de medición.</i>	48
<i>Figura 17. Posicionamiento y conexión de bomba centrífuga.</i>	49
<i>Figura 18. Correcciones del sistema hidráulico.</i>	50
<i>Figura 19. Puesta en marcha del sistema.</i>	50
<i>Figura 20. Identificación y reparación de fugas.</i>	51
<i>Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento de medición. Elaboración propia.</i>	52
<i>Figura 22. Disposición final del ramal 1 (punto de medición 7 y 8) y ramal 2 (punto de medición 1 y 2).</i>	53
<i>Figura 23. Disposición final del ramal 3 (punto de medición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8).</i>	53
<i>Figura 24. Ejemplo de tomas de presión para accesorios. Elaboración propia.</i> 54	
<i>Figura 25. Diferencias de presión entre el ramal 1 y 2. Elaboración propia.</i>	57
<i>Figura 26. Resultados del primer set de mediciones para codos de 90°. a) Primer codo y b) Cuarto codo.</i>	60
<i>Figura 27. Resultados del primer set de mediciones para codos de 45°.a) Segundo codo y b) Tercer codo.</i>	62
<i>Figura 28. Resultados del segundo set de mediciones para codos de 90°. a) Primer codo y b) Cuarto codo.</i>	64
<i>Figura 29. Resultados del segundo set de mediciones para codos de 45°. a) Segundo codo y b) Tercer codo.</i>	66

<i>Figura 30. Comportamiento del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo en codo de 90°. Elaboración propia.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31. Comportamiento del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo en codo de 45°. Elaboración propia.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32. Intervalo de confianza para coeficiente de resistencia en función del caudal en codos de 90°. Elaboración propia.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 33. Intervalo de confianza para coeficiente de resistencia en función del caudal en codos de 45°. Elaboración propia.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 34. Comparación de valores del coeficiente de resistencia “K” para codos de 90°. Elaboración propia.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 35. Comparación de valores del coeficiente de resistencia “K” para codos de 45°. Elaboración propia.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 36. Comparación de las pérdidas de carga en codo de 90°. Elaboración propia.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 37. Comparación de las pérdidas de carga en codo de 45°. Elaboración propia.....</i>	<i>80</i>

Índices de tablas

<i>Tabla 1. Longitud equivalente según tipo de accesorio [2].</i>	4
<i>Tabla 2. Coeficiente de pérdida de carga local para codo de 90° según Mańko & Laskowski [12].</i>	7
<i>Tabla 3. Coeficiente de resistencia “K” para accesorios de fusión Tigre [13].</i>	7
<i>Tabla 4. Coeficiente de resistencia “K” para accesorios Wefatherm [14].</i>	8
<i>Tabla 5. Coeficiente de pérdida de carga singular “K” para el método cinético [15].</i>	8
<i>Tabla 6. Variables para el cálculo del coeficiente de resistencia en codos según la normativa técnica complementaria mexicana [16].</i>	9
<i>Tabla 7. Longitud equivalente para conexiones y accesorios, medidas en metros de tubería lineal [17].</i>	10
<i>Tabla 8. Coeficiente C de Hazen - Williams [5].</i>	26
<i>Tabla 9. Propiedades Bomba centrífuga BCEN050</i>	32
<i>Tabla 10. Longitud de desarrollo del fluido para tramos lineales.</i>	35
<i>Tabla 11. Cubicación y presupuesto de la red de tuberías.</i>	41
<i>Tabla 12. Cubicación y presupuesto de accesorios y equipos del sistema de medición.</i>	42
<i>Tabla 13. Presupuesto del sistema hidráulico de medición.</i>	43
<i>Tabla 14. Presupuesto de la estructura soportante.</i>	43
<i>Tabla 15. Resultado tanda de medición del ramal 1 y 2.</i>	57
<i>Tabla 16. Evaluación de pérdidas de cargas locales por diferentes métodos para codos de 90°.</i>	77
<i>Tabla 17. Evaluación de pérdidas de cargas locales por diferentes métodos para codos de 45°.</i>	79

Resumen

El agua es un recurso esencial para los seres vivos que habitan el planeta, sin embargo, es un recurso limitado tanto por la oferta natural como por la infraestructura hidráulica existente. En muchos casos, la escasez hídrica no solo se asocia a la disponibilidad de este recurso, sino que también a la carencia de obras hidráulicas y deficiencias en el diseño, funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de distribución.

En este contexto, las redes de distribución de agua potable cumplen un rol fundamental, permitiendo llevar agua desde un punto de captación hasta cada artefacto domiciliario. Para garantizar un suministro de agua adecuado, es necesario realizar cálculos hidráulicos precisos, sin embargo, en la práctica suelen utilizarse diversas aproximaciones que generan una acumulación de errores e incertidumbre, especialmente en la estimación de las pérdidas de carga menor ocurridas en accesorios.

Las pérdidas de carga menor corresponden a la pérdida de energía cinética producida en accesorios como bombas, cambios de diámetro, válvulas y cambio de dirección. Para su cuantificación se utiliza el coeficiente de resistencia "K", el cual es un parámetro adimensional que representa una proporción de la energía cinética disipada en el accesorio, teniendo valores diferentes según la referencia consultada.

El objetivo de esta investigación fue determinar experimentalmente el valor del coeficiente de resistencia "K" en codos de 90° y 45° fabricados con Polipropileno Copolímero Random (PPR) con diámetro nominal de 25 [mm], evaluando su comportamiento en función del caudal. La metodología utilizada consistió en medir las diferencias de presión mediante un multipiezómetro considerando distintos caudales de trabajo, para luego calcular el coeficiente K mediante el método cinético a través de la ecuación de pérdida de carga menor.

Los resultados evidencian que, para ambos accesorios en estudio, el coeficiente de resistencia presenta una tendencia potencialmente decreciente a medida que aumenta el caudal de flujo. Con esta información se desarrollaron ecuaciones representativas para ambos accesorios, las que permiten estimar el valor de K, de forma precisa para aplicaciones prácticas.

Los valores obtenidos en esta investigación contribuyen a una estimación más precisa del coeficiente de resistencia K para codos de 90° y 45° fabricados con PPR, lo cual mejora la exactitud en el cálculo de las pérdidas de carga menor y, por ende, permite diseñar sistemas hidráulicos más eficientes y que favorecen la conservación del recurso hídrico.

Abstract

Water is an essential resource for all living beings; however, it is a limited resource, both in terms of natural supply and existing hydraulic infrastructure. In many cases, water scarcity is associated not only with the availability of said resource but also with a lack of hydraulic works and deficiencies in the design, operation, and maintenance of distribution systems.

In this context, drinking water distribution networks play a fundamental role, allowing water to be delivered from a collection point to each household appliance. To guarantee an adequate water supply, precise hydraulic calculations are necessary; however, in practice, diverse approximations are often used, leading to an accumulation of errors and uncertainty, especially in estimating minor pressure losses in fittings.

Minor pressure losses correspond to the loss of kinetic energy produced in fittings such as pumps, diameter change tubes, valves, and changes in direction. The resistance coefficient “K” is used to quantify resistance. This dimensionless parameter represents a proportion of the kinetic energy dissipated in the fitting, and its values vary depending on the reference consulted.

Therefore, the objective of this research was to experimentally determine the resistance coefficient “K” in 90° and 45° elbows made of Random Copolymer Polypropylene (PPR) with a nominal diameter of 25 mm, evaluating their behavior as a function of flow rate. The methodology consisted of measuring pressure differences using a multipiezometer at various operating flow rates, and then calculating the K coefficient using the kinetic method with the minor pressure loss equation.

The results show that, for both fittings studied, the resistance coefficient exhibits a potentially decreasing trend as the flow rate increases. Based on this information, representative equations were developed for both fittings, allowing for the precise estimation of the K value for practical applications.

The values obtained in this research contribute to a more accurate estimate of the resistance coefficient K for 90° and 45° elbows made of PPR, which improves the accuracy in calculating minor pressure losses and, therefore, allows the design of more efficient hydraulic systems that favor the conservation of water resources.

1. Capítulo 1: Generalidades

1.1. Introducción

Las redes de distribución de agua potable tienen como función principal el transporte del recurso desde la fuente hasta los distintos puntos de consumo, garantizando un uso eficiente de los materiales y presiones de servicio adecuadas. Sin embargo, no siempre se cumplen estas condiciones en la práctica, ya que dichos sistemas presentan pérdidas significativas de agua producto de fugas en las tuberías [1], las cuales se atribuyen, entre otras causas, a deficiencias en el diseño hidráulico. Estas fallas agravan el problema actual de escasez hídrica global, comprometiendo un servicio básico y esencial para el desarrollo de las comunidades.

Los volúmenes de agua que se transportan en las redes de distribución experimentan pérdidas de carga o de presión, las cuales se clasifican principalmente en pérdidas de cargas mayores y pérdidas de cargas menores. Las pérdidas de cargas mayores ocurren en tramos de tuberías longitudinales, mientras que las pérdidas de cargas menores, se generan ante la presencia de accesorios hidráulicos, tales como los codos [2]. Usualmente, las pérdidas menores suelen ser despreciadas debido a su baja magnitud, en comparación con las pérdidas de cargas mayores. Sin embargo, se ha demostrado que, en redes con alta densidad de accesorios, éstas pueden generar pérdidas superiores a las producidas en los tramos longitudinales [3]. Es por ello que resulta fundamental considerarlas para evitar errores en el cálculo de presiones en tuberías, en especial en las redes domiciliarias de agua potable.

En el cálculo de las pérdidas locales es necesario utilizar un coeficiente de resistencia o de pérdida menor (K), el cual es adimensional, y representa una proporción de la energía cinética perdida en el accesorio [4]. Los valores de este coeficiente varían dependiendo del autor, norma o catálogo de referencia, debido a la complejidad del fenómeno o a la omisión de las variables que lo definen.

Entre los múltiples parámetros que pueden afectar en el coeficiente de resistencia, se encuentra el material de la tubería, el cual modifica la fricción entre la pared interior de la tubería y las partículas de agua, influyendo directamente en el régimen de flujo [5].

Entre los materiales más utilizados para la confección de redes de abastecimiento domiciliario se encuentran el policloruro de vinilo (PVC), el cobre y el hierro galvanizado. Sin embargo, en los últimos años se incrementado el uso de las tuberías de polipropileno copolímero random (PPR) para las redes de distribución de agua potable [6]. Este material presenta una serie de beneficios, entre los que destacan su baja densidad, resistencia a altas temperaturas, buen aislamiento térmico, durabilidad y conexiones menos propensas a filtraciones [7].

A pesar de la variedad de materiales disponibles para el diseño de redes de abastecimiento de agua potable, con regularidad este factor no es considerado para la determinación de los coeficientes de resistencia, para los cuales solo se tiene en cuenta el diámetro y el tipo de accesorio. Esta exclusión afecta en los valores reales del coeficiente de resistencia y, en consecuencia, en la exactitud de la estimación de presiones a lo largo de las redes de distribución de agua potable.

Analizar correctamente las presiones de trabajo en los sistemas hidráulicos es esencial para prevenir fugas y garantizar un uso eficiente del recurso hídrico. En casos donde las presiones al interior de las tuberías son elevadas, se pueden producir tensiones internas excesivas provocando filtraciones o, en casos extremos, la rotura del material [8]. Por el contrario, presiones demasiado bajas impiden que el agua llegue con suficiente fuerza a las bocas de incendios y a los artefactos sanitarios de las viviendas, perjudicando las actividades diarias de las personas y, por consiguiente, afectando su seguridad.

La imprecisión existente en los valores del coeficiente de resistencia genera una reacción en cadena que deriva en estimaciones inexactas de las presiones reales existentes en el sistema de tuberías, influyendo directamente en la aparición de fugas. Es por ello que la determinación de valores exactos del coeficiente K

permite subsanar el vacío existente en el cálculo hidráulico de los sistemas de abastecimiento de agua potable, siendo un aporte clave para asegurar el funcionamiento hidráulico eficiente y seguro de las redes de distribución.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo determinar el coeficiente de resistencia en codos de 90° y 45° fabricados con PPR para uso domiciliario. Para ello, se implementó un sistema hidráulico, el cual permite variar el caudal de flujo y registrar las diferencias de presión del fluido a la entrada y salida de los accesorios, con el fin de determinar el coeficiente de pérdida menor según el diámetro específico de la red en análisis. De esta forma, se obtuvieron valores del coeficiente de resistencia específicos para tuberías de PPR, lo que permitirá realizar cálculos más precisos de las presiones en las redes de distribución de agua potable.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Principales investigaciones

El coeficiente de resistencia “K” es un parámetro indispensable en el cálculo de las pérdidas de cargas menores y, por ende, esencial en el diseño de redes presurizadas de agua potable. A pesar de ello, no existe un valor único del coeficiente para cada tipo de accesorio, ya que este varía dependiendo de la literatura o norma consultada. Estas variaciones se relacionan a las múltiples variables que intervienen en su determinación, las que resultan difíciles de controlar en la práctica.

El coeficiente de pérdida menor “K” se obtiene de manera experimental y se representa de acuerdo con el criterio del autor. Usualmente, los valores del coeficiente “K” se expresan en función del diámetro, radio de giro y tipo de accesorio. En otros casos, se estima mediante su relación con una longitud equivalente, la cual se refiere a un tramo de tubería recta que equivale a la misma resistencia al flujo que la producida por el accesorio. Un ejemplo de este método es el propuesto por Robert Mott y Joseph Untener (2015) en su libro *Mecánica*

de fluidos, donde se estipula que el valor de “K” depende de la relación de longitud equivalente y del factor de fricción, proveniente del diagrama de Moddy. Sin embargo, los autores presentan valores estandarizados según el diámetro de tubería de acero comercial, como se muestra en la tabla 1 [2].

Tabla 1. Longitud equivalente según tipo de accesorio [2]

Tipo	Longitud equivalente en diámetro de tubería L_e/D
Codo estandar de 90 °	30
Codo de 90 ° y radio largo	20
Codo de 90 ° para calle	50
Codor de 45° para calle	16
Codo estándar de 45°	26
Te estándar - Línea principal	20
Te estándar - Ramificación	60

Cengel & Cimbala (2006) presentan valores del coeficiente de pérdida menor “K” en función del tipo de accesorio analizado. Dichos valores son fijos para los accesorios de cambio de dirección, como se muestra en la figura 1.

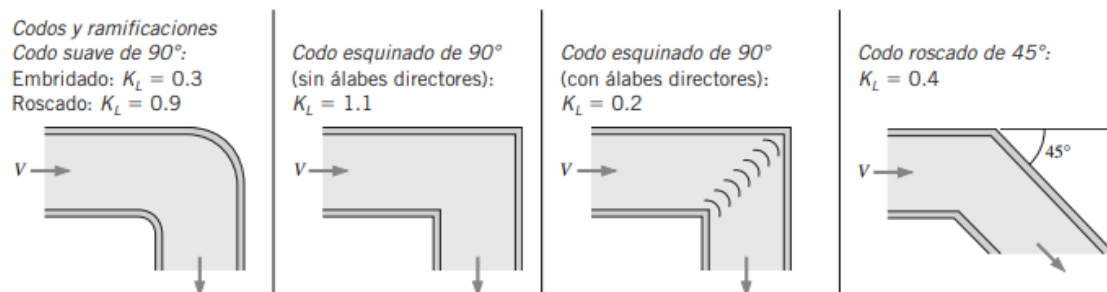


Figura 1. Coeficientes de pérdidas menores “K” para accesorios de tuberías estipulado por Cengel y Cimbala [4]

Por su parte Gilberto Sotelo (2011) plantea distintas formas para determinar el coeficiente de resistencia “K”. La selección del proceso para calcular el valor de “K” depende de las características del flujo y del tipo de accesorio en análisis.

Para tuberías circulares de diámetros menores, los valores del coeficiente “K” se establece en las gráficas de la figura 2, en las cuales se puede determinar el valor del coeficiente de resistencia según el tipo de accesorio y diámetro nominal.

Asimismo, se plantea un rango de variación en los valores obtenidos que oscilan entre un 10% y 30% según el accesorio analizado [9].

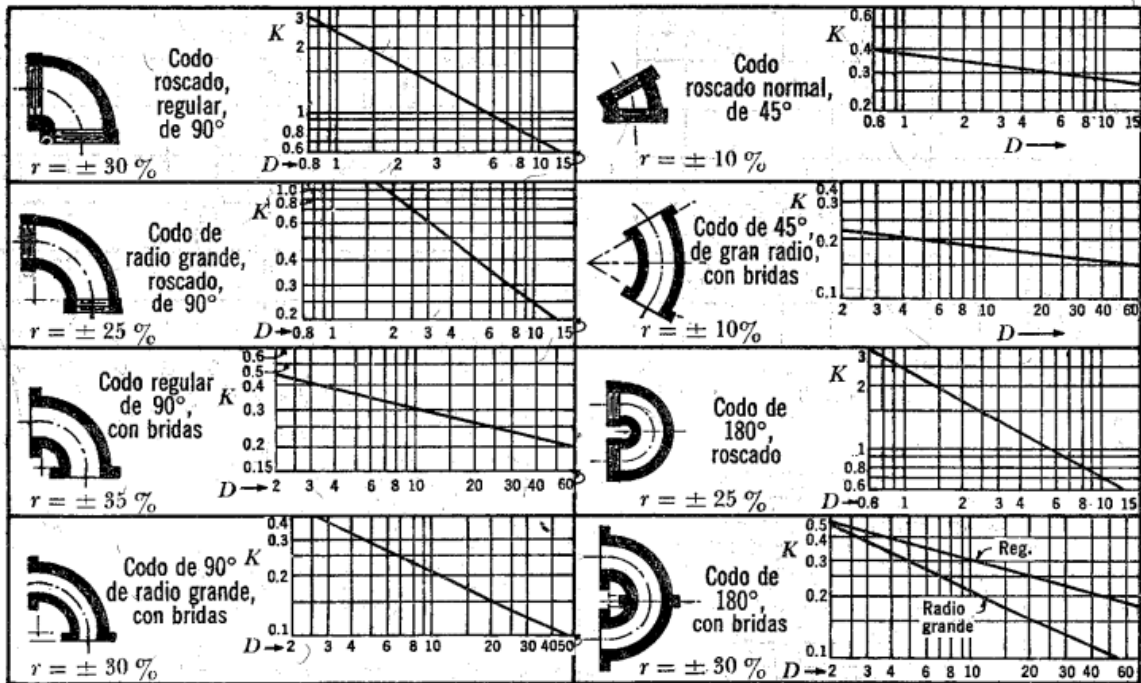


Figura 2. Coeficientes de pérdidas menores “K” según tipo de accesorio y diámetro nominal de tubería especificado por Sotelo [9].

Como se ha observado hasta el momento, no existe una unificación ni una determinación exacta del valor del coeficiente de resistencia “K” para cada caso específico, lo que ha llevado a profesionales del área a experimentar y calcular sus propios valores.

Ejemplo de ello, es el artículo desarrollado por Flores y Brito (2018), en el que se analizaron experimentalmente los valores de la constante “K” para distintos tipos de accesorios, para luego compararlos con los datos reportados en el libro “Cameron Hydraulic data”. Para ello se determinó el valor de “K” en función del caudal, sin embargo, no se especifica el diámetro de tubería analizado. Los resultados de este estudio presentan un valor promedio de “K” igual a 0.68 para codos de 90° con un error de 9.73% respecto a los valores bibliográficos de referencia, como se aprecia en la figura 3 [10].

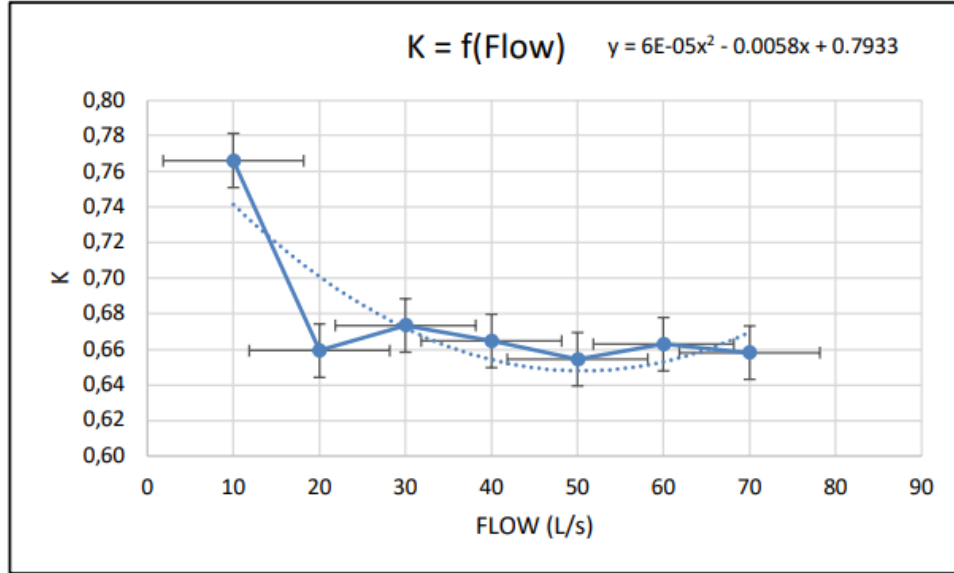


Figura 3. Representación de "K" en función del flujo según Flores y Brito (2018) [10]

En el año 2020, Silverio y Benavides publicaron el artículo titulado “*Determinación de pérdidas de carga en accesorios “K” de sistemas domiciliarios*”, en el cual, mediante un banco hidráulico y el diseño de tres distintos ramales de tuberías, se calcularon los coeficientes de resistencia “K” para accesorios tipo universal, Tee y codo de 90°.

En dicho estudio se verificó que el diámetro de la tubería y el valor del coeficiente de resistencia “K” son inversamente proporcional, aspecto que también es planteado por Gilberto Sotelo (2011). Los valores obtenidos para codos de 90° con diámetros de 12.5 [mm], 20 [mm] y 25 [mm] fueron 0.84, 3.36 y 1.65, respectivamente [11]. Sin embargo, cabe mencionar que no se evaluó el mismo caudal de flujo para cada caso.

Otro artículo relevante es el publicado en el año 2022 por Mańko & Laskowski, en el cual se analizaron los coeficientes de pérdida local “K” mediante tres metodologías: analítica, experimental y mediante modelado tridimensional [12]. Para el caso de los codos de 90°, se obtuvo que el menor valor de “K” corresponde al proporcionado por el fabricante, siendo este considerablemente inferior a los obtenidos mediante los otros métodos, como se observa en la tabla

2. Junto con ello se concluye que los valores del coeficiente de resistencia disminuyen a medida que los parámetros geométricos de los accesorios aumentan [12].

Tabla 2. Coeficiente de pérdida de carga local para codo de 90° según Mańko & Laskowski [12]

Tamaño	Valor del fabricante	Valor analítico	Valor del modelado	Valor medido en laboratorio
16 x 2.0 [mm]	3.5	15.8	13.6	20.2
20 x 2.0 [mm]	3.0	6.8	6.2	5.9
25 x 2.0 [mm]	2.0	4.3	3.7	3.5

Algunas empresas fabricantes de tuberías plásticas presentan catálogos detallados de sus accesorios, en los cuales incluyen los coeficientes de resistencia “K”. En específico la empresa Tigre presenta en los catálogos de sus productos una estimación del coeficiente de pérdida menor “K”, dependiendo del tipo de accesorio, pero no del diámetro ni de las características del flujo, como se muestra en la tabla 3 para las distintas variaciones en codos de 90° [13].

Tabla 3. Coeficiente de resistencia “K” para accesorios de fusión Tigre [13].

Accesorio	Coeficiente
Codo 90°	1.2
Codo 90° m/h	1.2
Codo 90° con rosca hembra	1.4
Codo 90° con rosca macho	1.6

El catálogo técnico publicado por Wefatherm en el año 2017 establece que, para determinar los diámetros necesarios para la red de tuberías se debe considerar una serie de datos, entre los que se encuentran el coeficiente de resistencia de accesorios y conexiones [14]. Los valores del coeficiente “K” para codos de 90° y 45° son presentados dependiendo del tipo de accesorio, siendo estos los que muestra la tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de resistencia “K” para accesorios Wefatherm [14].

Accesorio	Coeficiente
Codo 90°	2.0
3aCodo 90° i./a.	1.2
Codo 45°	0.6
Codo 45° i./a.	0.5

Existen normativas que establecen métodos de cálculos para redes presurizadas, en donde se especifican valores de coeficientes de pérdidas menores para distintos tipos de accesorios. La norma chilena NCh2485.Of2000 “Instalaciones domiciliarias de agua potable – Diseño, cálculo y requisitos de las redes interiores”, establece tres métodos hidráulicos para determinar las pérdidas de cargas menores: el método cinético, de longitud equivalente y simplificado. En el primer método, es decir, el método cinético, utiliza la ecuación general de pérdida menor (ver ecuación 2.19) para la determinación de las pérdidas locales [15]. En esta fórmula es necesario el coeficiente de resistencia “K”, el cual se encuentra especificado en la misma norma según el tipo de accesorio (ver tabla 5).

Tabla 5. Coeficiente de pérdida de carga singular “K” para el método cinético [15].

Tipo de accesorio	Coeficiente, K
Codo de 90°	0.9
Codo de 45°	0.4
Curva de 90°	0.4
Curva de 45°	0.2
Curva de 22° 30'	0.1

En México, la *normativa técnica complementaria para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas* especifica, al igual que en la normativa chilena, que para el cálculo de las pérdidas de cargas menores se debe utilizar la ecuación general de pérdida menor. Para accesorios tipo codo, el valor del

coeficiente “K” depende del diámetro, ángulo y radio de giro, como se muestra en la figura 4 [16].

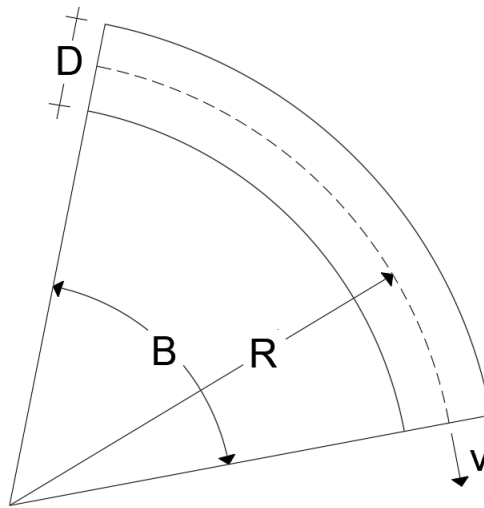


Figura 4. Representación de accesorio de cambio de dirección [16].

De acuerdo con lo especificado en la normativa técnica complementaria mexicana, el coeficiente de resistencia “K” no se calcula de forma directa. La determinación de “K” se obtiene a partir de la relación radio – diámetro y del ángulo del accesorio, las cuales permiten obtener los coeficientes “C” y “h” especificados en la tabla 6 con los cuales, mediante la ecuación 1.1, permiten calcular el valor de “K” [16].

$$K = C * h \quad (\text{Ecc. 1.1})$$

Tabla 6. Variables para el cálculo del coeficiente de resistencia en codos según la normativa técnica complementaria mexicana [16].

R/D	1	2	4	6 o más
C	0.52	0.31	0.25	0.22

b	10	20	30	40	60	90
h	0.20	0.38	0.50	0.62	0.81	1.00

Pese a lo establecido en la normativa mexicana mencionada, la revisión realizada en el año 2022 por la secretaria de educación pública establece que para el

cálculo de las pérdidas de cargas menores es válido utilizar una longitud equivalente, correspondiente a una longitud virtual que genera la misma pérdida de carga que el accesorio [17]. En la tabla 7 se muestran los valores de longitud equivalente para accesorios tipo codo de 90° y 45°, los cuales varían según el diámetro de tubería.

Tabla 7. Longitud equivalente para conexiones y accesorios, medidas en metros de tubería lineal [17].

Diámetro [mm]	Codo 90°	Codo 45°
9	0.3	0.20
13	0.6	0.40
19	0.75	0.45
25	0.90	0.55
32	1.20	0.80
38	1.50	0.90
51	2.15	1.20
63	2.45	1.50
76	3.05	1.80
89	3.65	2.15
102	4.25	2.45
127	5.20	3.05
152	6.10	3.65

A pesar de la relevancia del coeficiente de resistencia en el cálculo hidráulico de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se observa diferencias significativas entre las metodologías y valores especificados por distintos autores, normativas y catálogos de los fabricantes. Esta situación deja a criterio del proyectista o calculista la elección de dicho coeficiente “K” que considere más adecuado para su proyecto, lo cual provoca un cierto grado de incertidumbre en la estimación de las presiones internas de las redes de tuberías.

1.2.2. Materiales de los accesorios

Históricamente, las tuberías fabricadas con metales han sido las más utilizadas en los sistemas de transporte de agua potable. Sin embargo, la introducción de los polímeros técnicos ha cambiado esta tendencia, incrementando su demanda en esta área [7].

El auge en el uso de tuberías plásticas se debe a sus múltiples ventajas, entre las que destacan su bajo peso, alta resistencia a la corrosión, bajo consumo de energía para su fabricación, bajos costos de construcción y la presencia de paredes lisas que favorecen la conducción hidráulica del flujo [6]. Aquello explica que las tuberías plásticas sean utilizadas en el 85% del suministro de agua en edificaciones y en el 90% del suministro público de agua potable [6].

En los proyectos domiciliarios, las tuberías plásticas más utilizadas en el transporte de agua son el policloruro de vinilo (PVC) y el polipropileno copolímero random (PPR). La elección de estos materiales depende de aspectos determinantes, entre ellos la temperatura del fluido, las presiones internas, la durabilidad y las características constructivas. En muchas prácticas habituales es necesario contar con agua a temperaturas elevadas, en donde el material de la tubería debe poseer ciertas propiedades que permitan su transporte sin variaciones térmicas significativas. En este sentido, las tuberías de PPR resultan ser un material adecuado debido a su baja conductividad térmica, lo que las clasifica como un material con capacidad aislante [18].

Junto con ello, se ha demostrado que en el transporte de agua caliente, las tuberías de PVC son más propensas a la adhesión de bacterias como *Escherichia Coli* y a un mayor recuento de placas heterotróficas (HPC), en comparación con las tuberías de PPR [19]. Estas bacterias son perjudiciales para la salud humana, por lo que se debe limitar su concentración en el agua potable.

En cuanto a los aspectos constructivos de los sistemas de distribución de agua potable, el PPR ofrece diversas ventajas en comparación con los demás materiales empleados en estos sistemas. Entre ellas se puede mencionar los

menores tiempos de instalación, la facilidad de su manipulación debido a su bajo peso, la baja acumulación de microorganismos y la fiabilidad de sus uniones [7].

1.3. Problemática

Las obras hidráulicas son infraestructuras esenciales en el desarrollo de la sociedad, ya que garantizan el acceso seguro al agua. No obstante, se pierden grandes volúmenes de agua principalmente por las fugas presentes en el sistema de distribución [20]. Según el banco mundial, se estima que las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento producidas por fugas alcanzan el 35% del volumen producido, existiendo lugares que sobrepasan este porcentaje [21]. Esta información es confirmada por el estudio realizado por Beker y Kansal, quienes analizaron las pérdidas de agua en diversas ciudades etíopes, obteniendo que las pérdidas de agua promedio diaria varían entre el 38.49% y el 42.79% del agua producida como potable [22].

Las fugas ocurridas en una red de distribución de agua potable pueden ocurrir por distintos factores, siendo una de las principales causas el debilitamiento estructural producto de las tensiones internas (operativas) y externas (ambientales) [8]. En este aspecto, las presiones internas de las tuberías son un parámetro crítico [23], ya que elevadas presiones de trabajo pueden incrementar porcentajes de pérdidas de agua [24]. Para solucionar esta problemática, en primer lugar, se debe detectar la fuga, lo cual requiere de información precisa de las presiones a lo largo de toda la red de distribución. Sin embargo, esta tarea se dificulta por el alto grado de incertidumbre en el cálculo de las presiones en distintos puntos de la red [8].

En este contexto, las pérdidas menores ocurridas en accesorios suelen considerarse de baja magnitud en comparación con las pérdidas de cargas mayores producidas en tramos longitudinales de tuberías. A pesar de ello, en sistemas con alta densidad de accesorios las pérdidas menores adquieren mayor relevancia, pudiendo representar entre el 40% y el 60% de la caída de presión

total [3]. Para su estimación se utiliza el coeficiente de resistencia o de pérdida menor “K”, el cual considera una parte de la carga de velocidad perdida en el accesorio [4]. Este coeficiente varía según la velocidad del fluido, rugosidad de la tubería, características del fluido y diseño del accesorio, lo que determina que los coeficientes de pérdidas menores no tengan valores universales [25]. No obstante, la literatura técnica y las normativas suelen considerar el coeficiente “K” como un valor fijo, el que se determina únicamente según el tipo de accesorio y el diámetro de la tubería, lo cual genera controversia al momento del cálculo de presiones.

Entre los múltiples factores que provocan fugas en los sistemas de distribución de agua potable se encuentra la incorrecta selección de las tuberías. La elección del material y espesor de las tuberías está directamente relacionada con las presiones permisibles que tendrá esta, debido a las tensiones circunferenciales generadas por el fluido sobre la pared interior de la tubería [8]. Por ende, es fundamental disponer de información precisa sobre las presiones de trabajo, lo cual se correlaciona con un manejo adecuado de las fugas y, por ende, con una mitigación de las pérdidas de agua.

Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo la determinación de coeficientes de resistencia para codos de 90° y 45° fabricados de PPR, teniendo como variable el caudal de flujo. De esta forma, se busca contribuir al cálculo más preciso de las presiones presentes en un sistema de abastecimiento de agua potable, favoreciendo a un diseño hidráulico más confiable.

1.3.1. Aspectos ambientales

El acceso al agua es primordial para el desarrollo de distintas actividades como la agricultura, el uso doméstico y los procesos industriales. Sin embargo, solo el 3% del agua dulce del planeta se encuentra disponible en el continente para su uso [26]. Esta situación se agrava considerando que el uso global del agua mantiene un crecimiento constante del 1% anual, impulsado principalmente por

el crecimiento poblacional, aumento en el consumo per cápita y desarrollo económico [27]. En este sentido, se estima que de mantenerse las actuales prácticas comerciales, la demanda mundial de agua dulce podría superar un 40% la capacidad de suministro del planeta tierra para el año 2030 [28]. Estos antecedentes evidencian que el agua es un recurso limitado, el cual se debe conservar y manejar de manera eficiente para satisfacer las demandas futuras, requiriendo infraestructura adecuada para aquello.

El diseño eficiente de los sistemas hidráulicos contribuye en el manejo de los recursos hídricos, siendo una de sus problemáticas el alto porcentaje de desperdicio de agua, lo cual se ve reflejado en grandes volúmenes de agua no contabilizada. Las fugas generadas en tuberías no solo afecta al suministro de agua limpia, sino que genera pérdidas de energía, costos operativos y contaminación del agua con compuestos sintéticos y metales peligrosos [29]. Ante esta problemática, muchos países están realizando cambios para una gestión eficiente del agua, enfocándose en técnicas de disminución de pérdidas de los sistemas. Un caso destacado es el de Israel, quienes lograron disminuir de un 35% a un 10% las pérdidas de aguas generadas por fallas del sistema [21].

Teniendo estas consideraciones con respecto a los recursos hídricos y la importancia de la infraestructura hidráulica, la presente investigación se enfoca en el estudio de un parámetro específico que permita contribuir al cálculo minucioso de presiones. Este enfoque ayuda a prevenir presiones inadecuadas o fuera de las limitaciones del material que transporta al fluido. Con ello se tendrá un mejor resguardo y aprovechamiento del agua, generando un impacto positivo en el medio ambiente.

1.4. Justificación

Las pérdidas de cargas menores en las redes de distribución de agua potable son menos atendidas que las pérdidas de cargas mayores, ya que, en muchos casos, su magnitud es considerablemente menor. Sin embargo, en las redes de

abastecimiento domiciliario, que suelen contener una gran cantidad de accesorios, las pérdidas de cargas menores adquieren una relevancia significativa en las pérdidas totales de presión a lo largo de las tuberías de suministro de agua potable.

En el cálculo de las pérdidas de cargas locales, es importante identificar el valor del coeficiente de resistencia, el cual permite expresar la pérdida de presión ocurrida en el accesorio como una fracción de la energía cinética del fluido. Este coeficiente presenta una amplia variabilidad dependiendo la referencia utilizada. Ejemplo de aquello, son los valores entregados por la literatura para accesorios tipo codos 90° de 25 [mm] de diámetro, los cuales oscilan entre 0.3 a 4.3. En el caso de los codos de 45° , estos son menos estudiados por lo que se tienen menos valores de referencia para el coeficiente de resistencia, a pesar de ello, también presentan diferencias en los valores del coeficiente "K" los que varían entre 0.4 y 0.6. Estas variaciones se atribuyen a la influencia de múltiples variables que afectan al comportamiento del fluido bajo presión, en donde se identifica el caudal como factor diferencial en la determinación del coeficiente "K".

Como se puede inferir, la elección del coeficiente "K" puede generar controversias y confusión en el cálculo de las presiones de una red de tuberías. Esta situación se evidencia en proyectos de abastecimiento de agua domiciliarios, en los cuales existe una gran densidad de accesorios, en donde los codos de 90° y de 45° son lo que tienen mayor presencia. Considerando esto, es necesario generar información más detallada sobre las variaciones que tiene el coeficiente de resistencia en los accesorios, con el fin de proporcionar a los profesionales encargados del diseño de proyectos de distribución de agua potable herramientas que permitan un cálculo más preciso de las presiones al interior de las tuberías.

Las tuberías de PPR, cada vez son más populares en la confección de redes de distribución de agua, debido a sus múltiples ventajas con respecto a las tuberías de PVC las que han sido las más utilizadas en este tipo de sistemas. A pesar de tratarse de materiales con propiedades distintas, en la práctica no se considera

en los valores entregados para el coeficiente de resistencia, utilizándose generalmente los mismos valores para ambos materiales. Esta situación resalta la importancia de generar información cuantitativa específica para las tuberías de PPR, sobre todo tomando en cuenta que su aplicación en los sistemas hidráulicos continúa en aumento.

Por estas razones, se decide determinar el coeficiente de resistencia para codos de 90° y 45° fabricados con PPR, prestando especial cuidado con los cambios que se generen al aumentar o disminuir el caudal de flujo. Asimismo, se busca presentar los resultados obtenidos de forma gráfica, con el fin de facilitar la selección del coeficiente “K” por parte de los diseñadores de redes domiciliarias, de acuerdo con los caudales específicos del sistema. De esta manera, se aporta con información detallada del coeficiente de resistencia, contribuyendo al cálculo preciso de presiones para las redes de distribución de agua potable.

1.5. Hipótesis

Las variaciones del caudal de flujo dentro de las redes de distribución de agua potable, ocasionan modificaciones en el coeficiente de resistencia “K” para codos de 90° y 45°, fabricados con polipropileno copolímero random (PPR).

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Precisar el valor del coeficiente de resistencia “K” para codos de 90° y 45° hechos de PPR, mediante la pérdida de presión del accesorio a través de un sistema hidráulico con su respectiva red de tuberías utilizando caudal de flujo variable.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar documentos referentes a las pérdidas de cargas locales, en las que se consideren valores del coeficiente de resistencia “K”.
- Identificar las principales variables que influyen en las pérdidas de cargas locales para diámetros de uso común en redes domiciliarias de agua potable.
- Evaluar la ecuación general de pérdida menor como base para la obtención del coeficiente de resistencia “K”.
- Diseñar y construir un sistema de medición de pérdidas de carga menor que permita cuantificar la diferencia de presión entre la entrada y la salida de cada accesorio de la red de tuberías, considerando distintos caudales de flujo.
- Registrar y analizar los datos obtenidos de manera experimental mediante el sistema hidráulico diseñado para la medición de pérdidas locales.
- Establecer la relación entre el coeficiente de resistencia “K” y el caudal de flujo para cada uno de los accesorios analizados.

2. Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Propiedades de fluidos

En el ámbito de la ingeniería un fluido se considera un medio continuo, es decir, se asume que posee una distribución continua sin espacios vacíos, a pesar de la naturaleza aleatoria de su estructura molecular. De esta forma, el estudio de los fluidos se centra en el análisis de las condiciones medias de variables como la velocidad, presión, temperatura, densidad, peso específico, entre otras [9].

2.1.1. Densidad

La densidad (ρ) se define como la cantidad de masa (m) presente por unidad de volumen (V) (ecuación 2.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ecc.2.1})$$

Según lo señalado por Cengel & Cimbala, aumentar la presión en el agua líquida desde 1 [atm] hasta 210 [atm], provoca una variación aproximada de 1% en su densidad. En consecuencia, el agua líquida pueden considerarse incompresible, debido a que la densidad del fluido se mantiene prácticamente constante [4].

2.1.2. Peso específico

El peso específico (γ) está directamente relacionado con la densidad del fluido, y representa el peso del mismo (w) por unidad de volumen (V). Considerando que el peso del fluido resulta del producto de su masa (m) por la gravedad (g), se obtiene la siguiente relación para el peso específico del fluido (ecuación 2.2).

$$\gamma = \frac{m * g}{V} = \rho * g \quad (\text{Ecc. 2.2})$$

2.1.3. Viscosidad de fluido

La viscosidad de un fluido se refiere a la resistencia interna que presenta al movimiento, en otras palabras, a la facilidad con que el fluido puede desplazarse en su medio. Esta propiedad determina las características del flujo y condiciona la energía liberada producto de su movimiento.

Al relacionar el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación del fluido, se obtiene un coeficiente denominado **viscosidad dinámica (η)**. En muchos casos, la mecánica de fluidos, relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido, lo que da lugar a la **viscosidad cinemática (ν)**, la cual se representa mediante la ecuación 2.3 [2].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (\text{Ecc. 2.3})$$

La temperatura del fluido es un factor de gran relevancia, ya que, esta modifica los valores de su viscosidad. Por esta razón es que diversos autores han estudiado esta variable, dando valores específicos de viscosidad cinemática según la temperatura el fluido. Además, de esta propiedad depende la clasificación del tipo flujo, como se explica en el apartado 2.1.4.

2.1.4. Número de Reynolds

La necesidad de comprender el comportamiento de las líneas de flujo en tuberías generó que se desarrollen métodos cuantitativos para predecir el tipo de flujo presente. Entre 1880 y 1884, Osborne Reynolds, experimentó en este campo, formulando el número de Reynolds, el cual permite determinar el tipo de flujo sin necesidad de observar directamente el movimiento del fluido, considerando cuatro variables: densidad, viscosidad, diámetro de tubería y velocidad promedio del flujo [5].

El valor del número de Reynolds se determina mediante la ecuación 2.4, la cual permite definir el régimen de flujo en análisis, donde “v” representa la velocidad media del flujo, “D” el diámetro de la tubería y “ ν ” la viscosidad cinemática.

$$R_e = \frac{v * D}{\nu} \quad (\text{Ecc. 2.4})$$

De acuerdo con lo especificado por Saldarriaga, en su libro *Hidráulica de tuberías*, se establecen tres tipos de flujo en función del número de Reynolds [5].

- Si, $R_e < 2200$, Flujo laminar
- Si, $2200 < R_e < 4500$, Región crítica
- Si, $R_e > 4500$, Flujo turbulento

2.2. Presión

La presión es una magnitud que representa la fuerza ejercida de forma perpendicular sobre una superficie o área, la cual puede expresarse mediante la ecuación 2.5.

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecc. 2.5})$$

Para el cálculo de presiones en tuberías es necesario considerar presiones de referencia, siendo esta la atmosférica, la cual corresponde al peso de la columna de aire sobre un área específica y varía según la ubicación y condiciones climáticas [2].

La presión absoluta corresponde a la presión real presente en una determinada posición, mientras que la presión manométrica es la que comúnmente registran los instrumentos de medición de presión, la cual se obtiene a partir de la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica (ecuación 2.6).

$$p_{man} = p_{abs} - p_{atm} \quad (\text{Ecc. 2.6})$$

2.3. Ecuación de continuidad

La velocidad del flujo a lo largo de una tubería cerrada puede determinarse mediante el principio de continuidad, estableciendo un flujo estable, es decir, que la cantidad de fluido que atraviesa una sección de tubería en un tiempo determinado permanece constante [2].

Al analizar el volumen de control de una tubería en la que no se agrega o elimina fluido, se establece que la masa (M) en un tiempo determinado es constante, por lo tanto, la masa que entra al volumen de control es igual a la que sale, como se expresa en la ecuación 2.7.

$$M_1 = M_2 \quad (\text{Ecc. 2.7})$$

El caudal es el volumen que fluye en una sección específica en un intervalo de tiempo (t) acotado. También, se puede representar como la velocidad del flujo (v) en una sección determinada (A). Por ende, el caudal se puede expresar de acuerdo a lo señalado en la ecuación 2.8.

$$Q = \frac{V}{t} = v * A \quad (\text{Ecc. 2.8})$$

La masa de fluido que atraviesa una sección de tubería en un tiempo determinado, se puede relacionar con el caudal como muestra la ecuación 2.9.

$$M = \rho * Q \quad (\text{Ecc. 2.9})$$

Por lo tanto,

$$M = \rho * v * A \quad (\text{Ecc. 2.10})$$

La ecuación de continuidad relaciona la densidad del fluido, el área de la sección transversal y la velocidad del flujo, siendo aplicable para cualquier tipo de fluido.

Específicamente en el flujo de agua en tuberías, puede considerarse el agua como un fluido incompresible, es decir, de densidad constante. Por ende, al relacionar la ecuación 2.7 y 2.10, bajo esta condición, la ecuación de continuidad para líquidos queda expresada según lo indicado en la ecuación 2.11.

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (\text{Ecc. 2.11})$$

En donde, "v" es la velocidad del flujo y "A" es el área de la sección de tubería.

2.4. Conservación de energía

La ley de conservación de la energía establece que *"la energía no se crea ni destruye, solo se transforma"*. En el caso de los flujos en tuberías, es esencial considerar tres tipos de energías presentes: la energía potencial, energía de flujo y energía cinética [2].

Al analizar un tramo de tubería en el que no se produce transferencia energía desde o hacia el fluido, se puede plantear la ecuación 2.12 correspondiente a la conservación de energía.

$$\frac{w * p_1}{\gamma} + w * z_1 + \frac{w * v_1^2}{2 * g} = \frac{w * p_2}{\gamma} + w * z_2 + \frac{w * v_2^2}{2 * g} \quad (\text{Ecc. 2.12})$$

En donde, $\frac{w * p}{\gamma}$ corresponde a la energía de flujo, "w * z" es la energía potencial y $\frac{w * v^2}{2 * g}$ es la energía cinética.

2.5. Ecuación de Bernoulli (Ecuación de energía)

Al analizar la ecuación de conservación de energía (Ecc. 2.12), se observa que el peso está presente en todos los términos. Al dividir la ecuación entre el peso del fluido, cada término adquiere unidades de distancia, comúnmente expresada en metros o pies, las cuales se presentan como cargas y se interpretan como una

altura. De esta manera, la ecuación de Bernoulli se representa conforme a la ecuación 2.13.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} \quad (\text{Ecc. 2.13})$$

En donde, " $\frac{p}{\gamma}$ " es la carga de presión, "z" es la carga de elevación y " $\frac{v^2}{2g}$ " es la carga de velocidad.

Es importante destacar que para aplicar esta ecuación se requiere de las siguientes consideraciones: el fluido es incompresible, no existen dispositivos que añadan o extraigan energía, no existe transferencia de calor y no se consideran las pérdidas por fricción.

2.6. Ecuación general de energía

En el transporte de un fluido real a través de un conducto cerrado, se deben considerar factores que generen ganancias y pérdidas de presión. Las pérdidas de presión se originan de la liberación de calor producto de la fricción de la pared interior de la tubería con las partículas del fluido, y pueden incorporarse a la ecuación de energía como se observa en la ecuación 2.14.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} \quad (\text{Ecc. 2.14})$$

Donde, " h_A " es la energía incorporada por un dispositivo mecánico, " h_R " es la energía liberada por un dispositivo mecánico y " h_L " es la energía liberada por la fricción del fluido con la tubería.

2.7. Pérdidas de carga

A medida que el fluido es transportado en las redes de distribución de agua, se presentan factores que generan una disminución en la presión de flujo, lo cual se

conoce como pérdida de carga. Estas pérdidas son fundamentales para el diseño, funcionamiento y análisis de los sistemas hidráulicos.

Los principales factores que afectan a las pérdidas de cargas corresponden al tipo de fluido, la velocidad media de flujo y la naturaleza de la tubería [2].

Las pérdidas de carga en las redes de tuberías se pueden clasificar en dos grupos. En primer lugar, las pérdidas de carga primarias o mayores, generadas por la fricción de la pared interior de la tubería y las partículas de agua. En segundo lugar, se encuentran las pérdidas de cargas locales o menores, producidas en sectores específicos del sistema hidráulico, como son válvulas, codos, reducciones, ensanchamientos, entradas y salidas del sistema, entre otros tipos de accesorios hidráulicos.

De esta forma se plantea que la carga total pérdida (h_L) depende de la suma de ambos tipos de pérdidas, mayores y menores, como se expresa en la ecuación 2.15.

$$h_L = h_{L.Mayor} + h_{L.Menor} \quad (\text{Ecc. 2.15})$$

En donde, " $h_{L.Mayor}$ " son las pérdidas mayores y " $h_{L.Menor}$ " son las pérdidas menores.

2.7.1. Pérdidas de cargas mayores

Durante el transporte de agua en redes de tuberías, y en especial en tramos de tubería de gran longitud, el fluido interactúa constantemente con la pared interna, produciendo una disipación de energía en forma de energía térmica. Debido a esta fricción, se genera una reducción en la capacidad del sistema y una disminución en la presión de flujo, fenómeno denominado pérdida de carga mayor [30].

Para estimar estas pérdidas se han desarrollado diversas ecuaciones de cálculo, entre las que destacan las ecuaciones de Darcy – Weisbach y Hazen – Williams.

2.7.1.1. Ecuación de Darcy - Weisbach

La ecuación de Darcy – Weisbach (ecuación 2.16) es la más reconocida para el cálculo de las pérdidas de carga mayores. Esta ecuación considera tanto las propiedades del fluido (viscosidad, velocidad y densidad) como las características de la tubería (longitud y diámetro).

$$h_{L.Mayor} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (\text{Ecc. 2.16})$$

En donde, el parámetro “ f ” corresponde al factor de fricción, el cual puede determinarse mediante el diagrama de Moddy. Este diagrama relaciona la rugosidad relativa y el número de Reynolds con el fin de obtener el valor del factor de fricción.

Es importante destacar que para flujos en zona de transición (valores de Reynolds entre 2200 y 4500), el diagrama de Moddy no traza curvas definidas, siendo necesario emplear la ecuación de Colebrook y White (ecuación 2.17) [30].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Ecc. 2.17})$$

Donde, “ ε ” es la rugosidad absoluta, “ D ” es el diámetro interior de la tubería y “ R_e ” es el número de Reynolds.

2.7.1.2. Ecuación de Hazen – Williams

En 1906, G. S. Williams y A. H. Hazen plantearon la ecuación de Hazen – Williams, la cual se consolidó como una de las más relevantes después de la ecuación de Darcy – Weisbach. Esta ecuación, tiene la ventaja de ser explícita para el caudal y de sencilla aplicación para el diseño de redes de tuberías [5] (ecuación 2.18).

$$h_f = \frac{10.67}{C^{1.85} D^{4.85}} * Q^{1.855} \quad (\text{Ecc. 2.18})$$

Donde, “C” es el coeficiente de rugosidad de H - W, “Q” es el caudal, “D” es el diámetro interior.

El coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams indica la resistencia al flujo producto de la rugosidad de las paredes interiores de la tubería. Según lo señalado por Gavilánez-Luna, F., el coeficiente de Hazen-Williams en tuberías de plástico presenta una menor influencia a medida que aumenta la presión interna del elemento transportador [31], por ende, su valor puede variar dependiendo de las condiciones específicas de operación. Sin embargo, Juan Saldarriaga propone valores fijos para cada material, dependiendo del diámetro y los años de servicio de la tubería. Estos valores son los utilizados normalmente en la práctica, debido a su sencilla aplicación, siendo presentados a continuación.

Tabla 8. Coeficiente C de Hazen - Williams [5].

Material	Condición	Diámetro [mm]	Cw
Acero soldado	Constante	d ≥ 300	120
		200 ≤ d ≤ 250	119
		100 ≤ d ≤ 150	118
PVC	Constante	Todos	150
Cobre	Constante	Todos	130-140
Hierro galvanizado	Constante	Todos	120

Como se puede observar en la tabla 8 propuesta por Saldarriaga, no se encuentra dentro de las alternativas el Polipropileno Copolímero Random (PPR). Esta omisión genera que, en la práctica, los proyectistas y calculistas asignen al PPR el mismo coeficiente que el PVC, pese a que tienen características distintas. Los resultados evidencian que las tuberías de PVC son un 14% más eficientes que

las tuberías de PPR, debido a su menor rugosidad interna y, por lo tanto, tienen una superficie interior más lisa reduciendo sus pérdidas por fricción [32].

2.7.2. Pérdida de cargas menores

En todos los accesorios de una red de distribución, se presenta una pérdida de carga que se asocia a una disminución de presión, esto se denomina pérdida de carga menor o local.

Las pérdidas de cargas menores se expresan como una fracción de la carga de velocidad promedio en la tubería. En el caso particular de los accesorios que implican una ampliación de diámetro se considera la velocidad del flujo correspondiente a la tubería de menor diámetro [2].

Por lo tanto, la ecuación general de pérdida menor se representa mediante la ecuación 2.19 [9].

$$h_{L.Menor} = K * \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ecc. 2.19})$$

Donde, " $\frac{v^2}{2g}$ " es la carga de velocidad y "K" es el coeficiente de resistencia o de proporcionalidad.

2.8. Coeficiente de resistencia o de pérdida menor

El coeficiente de resistencia "K" es un parámetro adimensional, el cual depende del diámetro de la tubería, la rugosidad interior de la tubería, el número de Reynolds y los detalles de diseño del accesorio [4]. Mediante la ecuación 2.19, es posible despejar el coeficiente de resistencia como se muestra en la ecuación 2.20.

$$K = h_{L.Menor} * \frac{2g}{v^2} \quad (\text{Ecc. 2.20})$$

3. Capítulo 3: Método

La metodología empleada en esta investigación se conforma por distintas etapas que siguen los principios del método científico.

En primer lugar, se realizó el planteamiento de la problemática, la recopilación de información bibliográfica y la definición del proceso general para la obtención de la solución.

Luego, se desarrollaron las etapas de diseño, construcción y pruebas pilotos del sistema hidráulico. Estas fases se ejecutaron con especial cuidado, ya que constituyen una parte crítica de la investigación, en donde fue esencial garantizar la ausencia de fugas y la correcta medición de presiones mediante el multipiezómetro.

Posteriormente, se procedió con la fase experimental, en la cual se midieron las diferencias de presión entre la entrada y salida de cada accesorio. Con ello se calculó el coeficiente de resistencia “K” en función de distintos caudales de prueba.

Finalmente, mediante los valores obtenidos para “K”, se comprueba o rechaza la hipótesis planteada, presentando los resultados y conclusiones de la investigación de forma gráfica.

Con el fin de representar de manera gráfica el proceso metodológico descrito, se muestra la figura 5 con el diagrama de flujo con las etapas principales desarrolladas en la investigación.

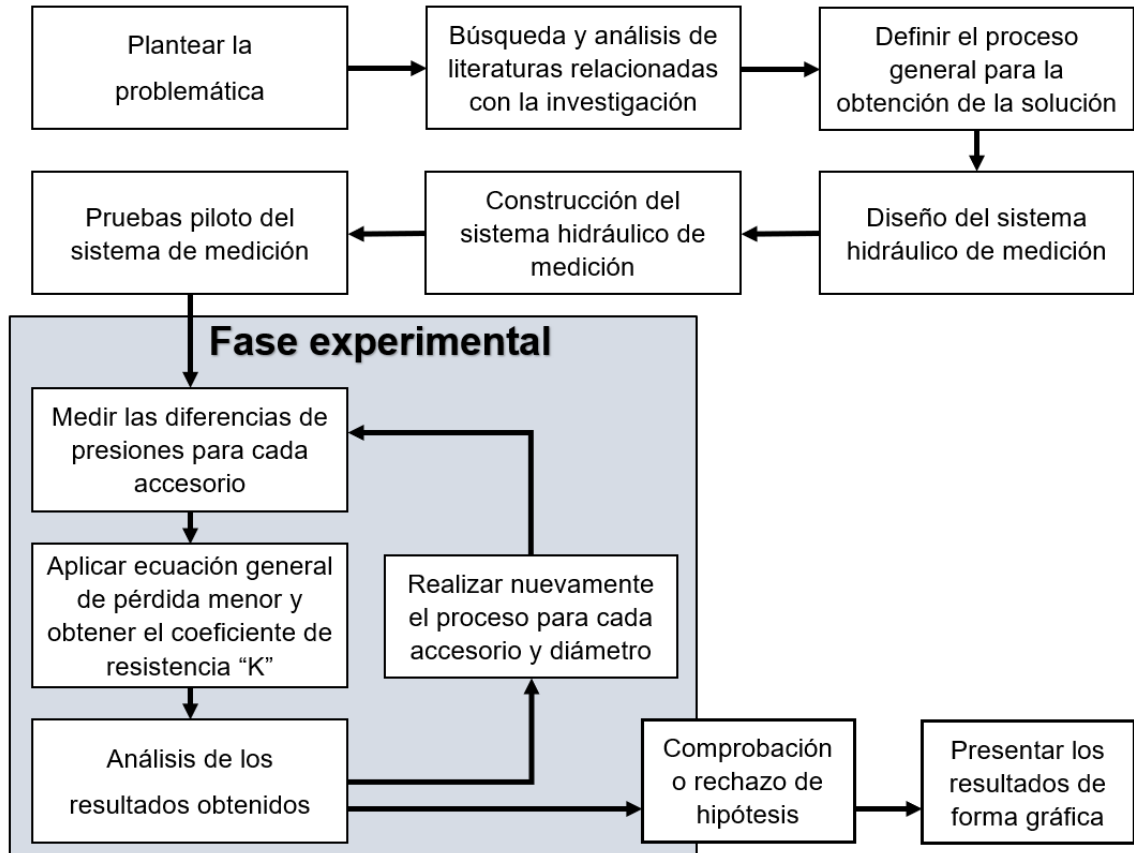


Figura 5. Diagrama del método de la investigación. Elaboración propia.

3.1. Diseño del sistema hidráulico de medición

Entre las etapas desarrolladas en esta investigación, una de las más relevantes es el diseño del sistema hidráulico y de la red de tuberías, lo cual permite realizar la fase experimental para la obtención de datos. En este proceso se realizó una serie de actividades que permitieron definir el diseño final del sistema hidráulico acorde con los objetivos de la investigación.

En primer lugar, se realizó un estudio de los accesorios que están presentes en las redes domiciliarias de agua potable. Junto con ello, se identificaron las herramientas que pudieran ser útiles y que estén disponibles en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Posteriormente, se desarrollaron los cálculos de longitud de desarrollo de las tuberías y las presiones que se pueden generar dependiendo de las diversas configuraciones del sistema hidráulico y los métodos de cálculo empleados. Con ello se definieron distintas opciones de diseño para el sistema de medición.

Finalmente, se ajustaron los diseños considerando sus limitaciones relacionadas a las presiones críticas y los parámetros de operación del sistema. Con estas opciones se seleccionó el diseño final del sistema hidráulico de medición.

Con el objetivo de presentar gráficamente las fases descritas, la figura 6 presenta el diagrama de flujo correspondiente al diseño del sistema hidráulico de medición.

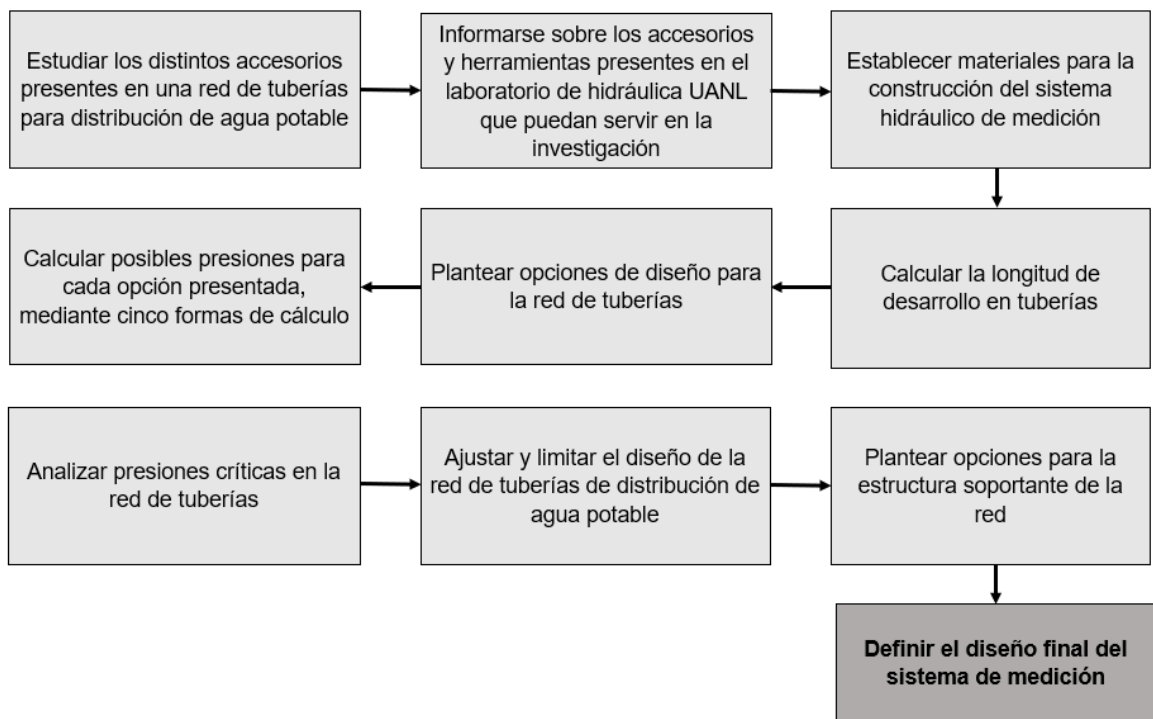


Figura 6. Diagrama del diseño del sistema hidráulico. Elaboración propia.

3.1.1. Materiales existentes en el laboratorio

El laboratorio de hidráulica del instituto de Ingeniería Civil de la UANL cuenta con equipamiento necesario para la elaboración del sistema hidráulico de medición diseñado. Entre estos equipos se encuentran:

- **Tableros multipiezométricos:** El laboratorio de hidráulica UANL dispone de dos multipiezómetros marca Armfield que permiten la medición de cuatro accesorios, es decir, ocho tubos piezométricos por instrumento, con rangos de medición entre 0 a 450 [mmca].
- **Banco hidráulico:** Se cuenta con un banco hidráulico marca Armfield, el cual fue utilizado como cisterna para alimentar la red de tuberías durante la fase experimental de la investigación.

3.1.2. Accesorios

El sistema hidráulico considera diversos elementos, que permiten controlar y medir los flujos de agua en la red de tuberías. Cada uno de los accesorios se encuentran dispuestos en la red con el fin de establecer el comportamiento hidráulico del fluido.

A continuación, se describen los principales accesorios que conforman el sistema hidráulico propuesto.

- **Bomba:** Para el transporte de agua, en muchos casos, es necesario agregar dispositivos que añadan energía al sistema para impulsar el fluido, para ello se utilizan las bombas. Existen diversos tipos de bombas, siendo las bombas centrífugas las más utilizadas en el área de la hidráulica [30].

Las bombas centrífugas tienen como principio conducir el líquido hacia el rodete, donde mediante la fuerza centrífuga se aumenta la presión de salida del líquido. En el caso de esta investigación se utilizará una **bomba centrífuga modelo BCEN050, marca Master Hardware**, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades Bomba centrífuga BCEN050

Bomba centrífuga	
Marca	Master Hardware
Modelo	BCEN050
Frecuencia	60 [Hz]
Potencia	1/2 HP
Flujo máximo	110 [l/min]
Máxima altura	23 [m]
Profundidad máxima de succión	8 [m]
Temperatura máxima del agua	60 °C

- **Manómetro:** Los manómetros se utilizan para medir la presión de un fluido. La mayoría de estos dispositivos están calibrados de tal forma que indiquen una lectura de cero en condiciones atmosféricas, permitiendo medir la presión manométrica [4].

En este caso, se instalaron manómetros con el objetivo de verificar las presiones al inicio y final de la red de tuberías, es decir, posterior a la válvula de compuesta y previo al punto de descarga. Los manómetros utilizados son de la marca DEWIT con un límite máximo de medición de 2 [Kg/cm²].

- **Válvulas:** Las válvulas son instrumentos comunes en los sistemas de abastecimientos de agua potable y se utilizan para controlar o interrumpir el flujo. En el mercado se dispone de una amplia variedad de estos componentes, entre las cuales se pueden mencionar las válvulas de globo, de ángulo, de compuerta, de mariposa y de retención [5].

Para efectos del presente trabajo se ocuparon cuatro válvulas de esfera de 25 [mm] marca Tuboplus. Tres de estas válvulas se posicionan en el inicio de cada ramal de estudio y una se encuentra previo a la zona de descarga.

- **Multipiezómetros:** Los tubos piezométricos o piezómetros, son conductos verticales que permiten determinar la presión en un punto específico del sistema, midiendo la presión estática del fluido en la toma del tubo [4].

Para la presente investigación se utilizaron dos multipiezométricos con un rango de medición de 0 a 450 [mmca].

3.1.3. Tramos longitudinales

- **Tuberías:** Las tuberías utilizadas son de Polipropileno Copolímero Random (PPR), de 25 [mm] de diámetro nominal. Para el cálculo de presiones se considera una tubería PPR-PN 16 (Clase 16), con un espesor de la pared de tubería de 2.3 [mm], conforme a lo especificado por la normativa chilena NCh2556.Of2000 “Tubos de propileno copolímero random para conducción de agua fría y caliente bajo presión”.

En muchos casos se asume que la pérdida de carga menor ocurrida en accesorios afectan al fluido de forma local, sin embargo, influye en una cierta distancia aguas abajo [4].

La pared interior de la tubería genera un esfuerzo de corte (t_w) que se opone al movimiento del fluido, el cual varía según el porcentaje de desarrollo del flujo. Para representar esta situación se presenta la figura 7, en la que se puede observar el desarrollo de la velocidad promedio del fluido dentro de la tubería.

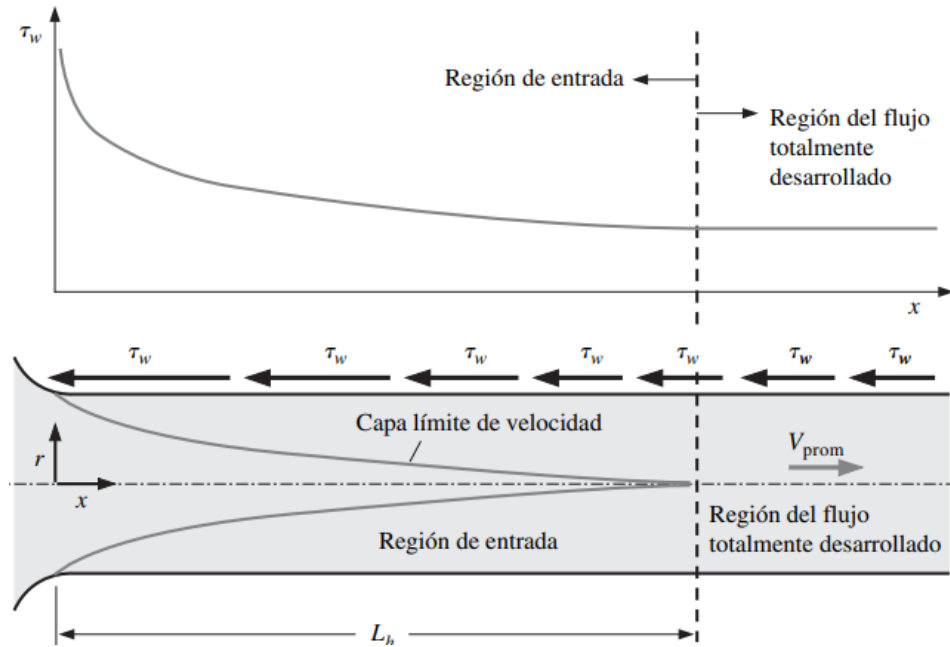


Figura 7. Variación del esfuerzo de corte de la pared sobre el fluido [5]

En este contexto, Cengel y Cimbala presentan dos ecuaciones para determinar la longitud de entrada hidrodinámica según el tipo de flujo que se presente dentro de la tubería [4].

$$\text{Flujo laminar: } L_{h,laminar} \cong 0.05 * R_e * D \quad (\text{Ecc. 3.1})$$

$$\text{Flujo turbulento: } L_{h,turbulento} \cong 1.359 * R_e^{1/4} * D \quad (\text{Ecc. 3.2})$$

Donde, “ R_e ” es el número de Reynolds y “ D ” es el diámetro interior de la tubería.

De esta manera, se realizaron los cálculos de la longitud de desarrollo para los tramos longitudinales del sistema hidráulico de medición diseñado. Para ello, se consideró un diámetro de 25 [mm] y velocidades entre 0 a 2.5 [m/s]. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Longitud de desarrollo del fluido para tramos lineales.

Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Diámetro interior [mm]	Velocidad [m/s]	Caudal		Número de Reynolds		Longitud de desarrollo [m]
				Q [m ³ /s]	Q [l/min]	Valor	Tipo de flujo	
25	2.3	20.4	0	0.00	0.00	0.00	Laminar	0.00
25	2.3	20.4	0.1	0.00	1.96	2281.88	Crítica	0.19
25	2.3	20.4	0.2	0.00	3.92	4563.76	Turbulento	0.23
25	2.3	20.4	0.3	0.00	5.88	6845.64	Turbulento	0.25
25	2.3	20.4	0.4	0.00	7.84	9127.52	Turbulento	0.27
25	2.3	20.4	0.5	0.00	9.81	11409.40	Turbulento	0.29
25	2.3	20.4	0.6	0.00	11.77	13691.28	Turbulento	0.30
25	2.3	20.4	0.7	0.00	13.73	15973.15	Turbulento	0.31
25	2.3	20.4	0.8	0.00	15.69	18255.03	Turbulento	0.32
25	2.3	20.4	0.9	0.00	17.65	20536.91	Turbulento	0.33
25	2.3	20.4	1	0.00	19.61	22818.79	Turbulento	0.34
25	2.3	20.4	1.1	0.00	21.57	25100.67	Turbulento	0.35
25	2.3	20.4	1.2	0.00	23.53	27382.55	Turbulento	0.36
25	2.3	20.4	1.3	0.00	25.49	29664.43	Turbulento	0.36
25	2.3	20.4	1.4	0.00	27.46	31946.31	Turbulento	0.37
25	2.3	20.4	1.5	0.00	29.42	34228.19	Turbulento	0.38
25	2.3	20.4	1.6	0.00	31.38	36510.07	Turbulento	0.38
25	2.3	20.4	1.7	0.00	33.34	38791.95	Turbulento	0.39
25	2.3	20.4	1.8	0.00	35.30	41073.83	Turbulento	0.39
25	2.3	20.4	1.9	0.00	37.26	43355.70	Turbulento	0.40
25	2.3	20.4	2	0.00	39.22	45637.58	Turbulento	0.41
25	2.3	20.4	2.1	0.00	41.18	47919.46	Turbulento	0.41
25	2.3	20.4	2.2	0.00	43.14	50201.34	Turbulento	0.41
25	2.3	20.4	2.3	0.00	45.11	52483.22	Turbulento	0.42
25	2.3	20.4	2.4	0.00	47.07	54765.10	Turbulento	0.42
25	2.3	20.4	2.5	0.00	49.03	57046.98	Turbulento	0.43

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 10, se puede observar que a medida que aumenta el caudal, los valores para el número de Reynolds también incrementan. En la mayoría de los casos, se obtuvieron flujos con régimen turbulento, a excepción de las velocidades menores a 0.2 [m/s].

Con respecto a la longitud de desarrollo, se aprecia un aumento progresivo a medida que aumenta la velocidad del fluido. Para la mayor velocidad, es decir, 2.5 [m/s], se obtuvo la longitud de desarrollo máxima, la cual es de 0.43 [m].

Por lo anterior es que, para efectos del diseño y construcción del sistema hidráulico, se utilizó una longitud de desarrollo de 50 [cm], lo cual garantiza un flujo completamente desarrollado durante las mediciones en la fase experimental.

3.1.4. Dimensionamiento del sistema hidráulico de medición

La red de tuberías diseñada para esta investigación tiene como principal consideración la claridad y precisión de las mediciones experimentales, por lo que se dispuso de tres ramales de medición, con el fin de comparar el comportamiento hidráulico según cada configuración.

La elección del diseño consideró la disponibilidad de los diversos elementos y equipos necesarios para construir el sistema hidráulico. En este sentido, se optó por una red de tuberías de PPR de 25 [mm] de diámetro nominal, debido a la confiabilidad y resistencia de este material.

En el sistema también se consideraron otros accesorios, entre ellos codos, tees, tuercas unión y coples junto con ello se incorporaron componentes de control como manómetros, válvulas de esfera, válvula de globo y manómetros.

El diseño final del sistema hidráulico de medición es representado en la figura 8, mostrada a continuación.

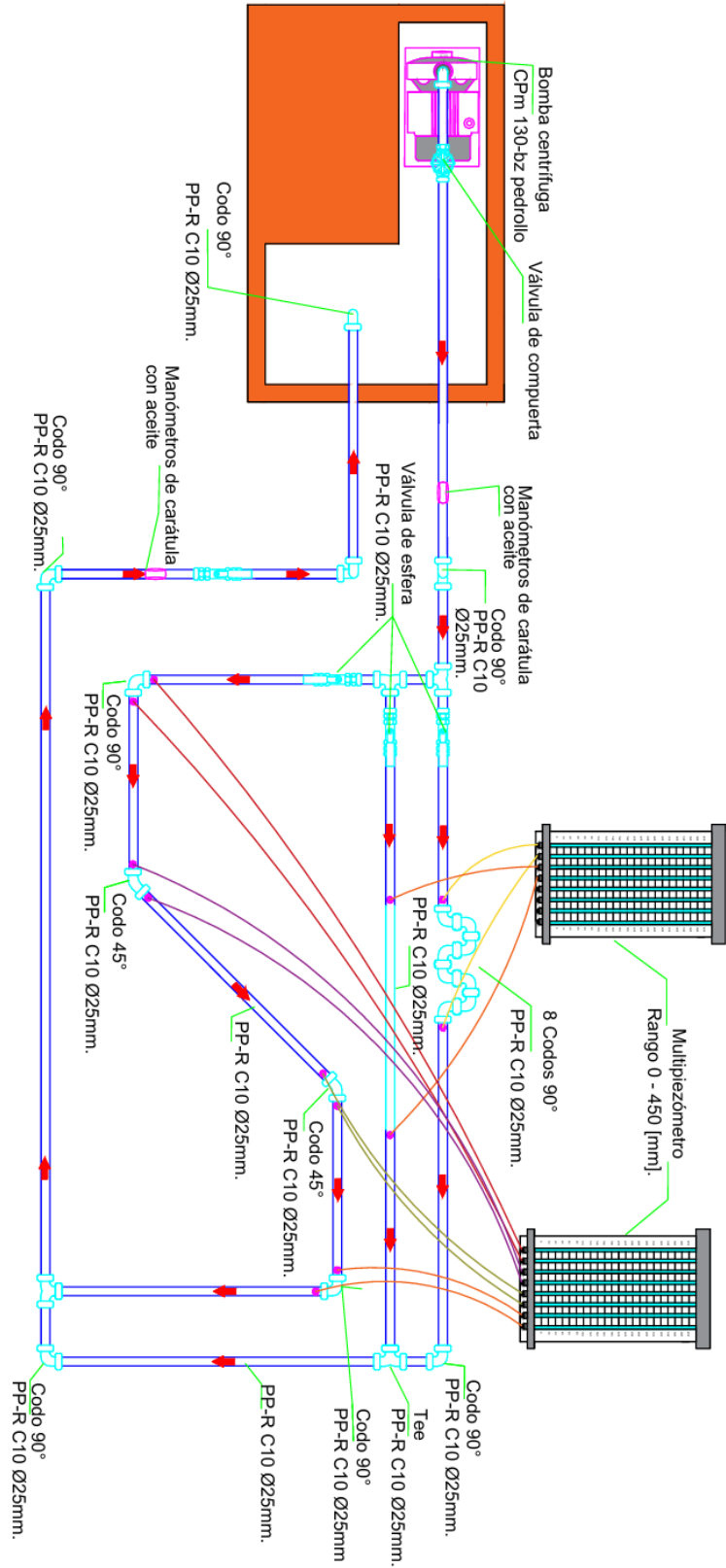


Figura 8. Sistema de medición hidráulica. Vista en planta. Elaboración propia.

Al diseño propuesto se le realizó un cálculo preliminar de las diferencias de presiones ocurridas en la red de tubería, con el objetivo de asegurar su correcta operación durante la fase experimental. Para este cálculo se utilizó la ecuación de Hazen-Williams y Fair-Whipple-Shiao para la estimación de pérdidas de cargas mayores, y el método cinético para las pérdidas de cargas menores. Con ello se obtuvieron las diferencias de presiones entre el inicio y el final del ramal más desfavorable, limitando dichas diferencias de pérdidas a un valor máximo de 450 [mmca], ya que esa es la medición máxima de los multipiezómetros disponibles en laboratorio. Como resultado, se determinó que el caudal máximo con el que podrá trabajar la bomba para que el piezómetro logre detectar la diferencia de presión será de 40 [L/min]. Además de esta limitación, se consideró la altura de instalación de los multipiezómetros, factor que está directamente relacionado a la presión disponible de acuerdo a la altura manométrica que entrega la bomba. En un inicio los multipiezómetros fueron posicionados a una altura de 1.7 [m], elevándose gradualmente conforme se requiere analizar caudales mayores.

Para la estructura soportante se diseñó una estructura de madera, la cual fue seleccionada por la facilidad y menor tiempo de construcción en comparación con otros materiales como el acero, además requiere un uso básico de herramientas para ejecutarlo. Esta estructura consta de dos burritos de 29 [pulg] de altura, con ruedas giratorias de 3 [pulg] en su base. Sobre este soporte se une una hoja de madera contrachapada de 2.44 [m] por 1.22 [m] recubierta con pintura acrílica impermeable con el fin de evitar que el agua deteriore la madera. La representación de la estructura soportante se muestra en la figura 9.

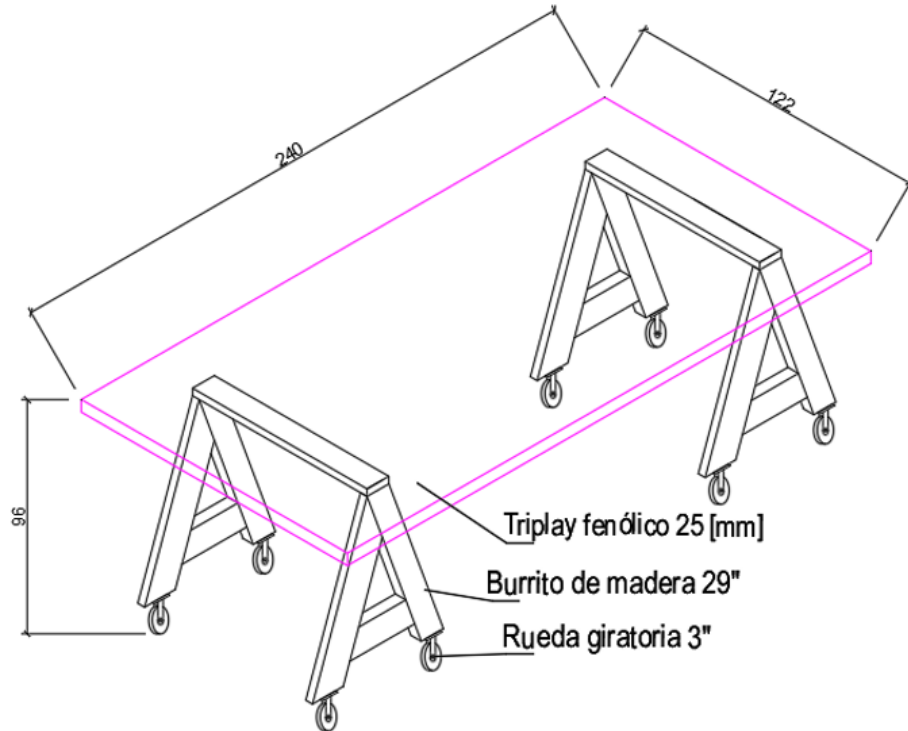
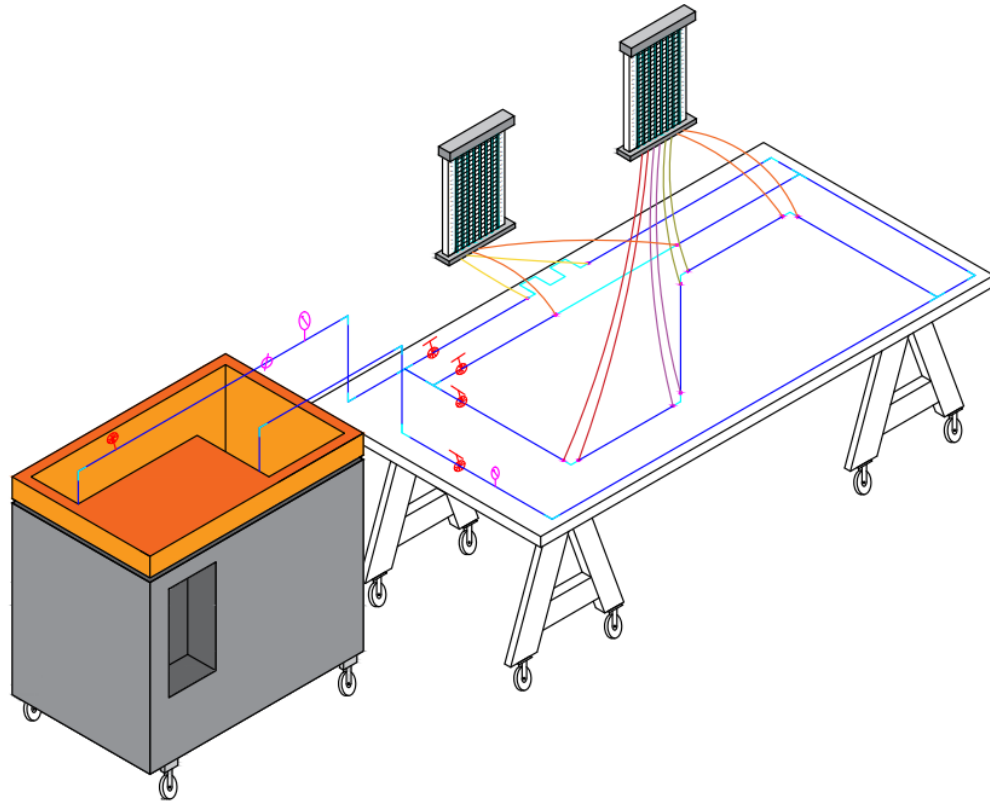


Figura 9. Estructura de madera. Vista en isométrico. Elaboración propia.

Una vez definida la red de tuberías, la zona de almacenamiento y bombeo, y la estructura soportante, se obtuvo el diseño final del sistema hidráulico de medición. Este diseño permite garantizar una medición precisa de las presiones en los puntos de análisis establecidos.

El diseño final se presenta en la figura 10, en donde cabe destacar que se realizaron modificaciones mínimas producto de ajustes necesarios durante su construcción.



*Figura 10. Representación final del sistema de medición de pérdidas menores.
Elaboración propia.*

3.2. Presupuesto del sistema hidráulico

La construcción del sistema hidráulico de medición descrito en el inciso 3.1 implica un costo económico asociado a los materiales, equipos y estructura requerida. Por ello, se realizó un análisis económico con el objetivo de estimar los costos correspondientes a todos los componentes que integran la red de distribución de agua, así como a la estructura soportante donde se instaló el sistema hidráulico.

El cálculo del presupuesto consideró, en primera instancia, la cotización de la red de tuberías, con sus respectivos equipos y accesorios hidráulicos. Posteriormente, se realizó la cotización de la estructura soportante, de acuerdo a lo detallado en el inciso 3.1.4. Finalmente, a partir de ambos análisis, se elaboró la cotización final del sistema hidráulico de medición, la cual presenta el presupuesto total estimado para la ejecución del diseño propuesto.

3.2.1. Cotización de la red de tuberías

El análisis de los costos asociados a la construcción de la red de tuberías incluyó la selección y valoración económica de todos los elementos que integran el sistema, determinando las cantidades requeridas y los precios unitarios de cada elemento.

En primer lugar, se realizó la cotización correspondiente a las tuberías del sistema hidráulico, considerando tuberías de PPR, clase 16, con diámetro nominal de 25 [mm]. Su costo unitario es de \$38.32 pesos mexicanos por metro lineal, ya que el sistema requiere de 14.64 [m] de tubería, el costo total es aproximadamente \$561 pesos mexicanos. El detalle de este análisis se presenta en la tabla 11.

Tabla 11. Cubicación y presupuesto de la red de tuberías.

Detalle	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Precio [\$/m]	Total [\$]
Bomba - A	25	0.4	38.32	15.33
A - B	25	1.17	38.32	44.83
B - C	25	0.4	38.32	15.33
C - D	25	0.3	38.32	11.49
D - E	25	0.65	38.32	24.90
E - F	25	0	38.32	0.00
F - G	25	0.97	38.32	37.17
G - H	25	0.19	38.32	7.28
H - I	25	0.89	38.32	34.10
I - Ñ	25	0.2	38.32	7.66
D - J	25	0.15	38.32	5.75
J - K	25	0.73	38.32	27.97
K - L	25	0.58	38.32	22.22
L - M	25	0.58	38.32	22.22
M - N	25	0.58	38.32	22.22
N - Ñ	25	0.78	38.32	29.89
Ñ - O	25	2.04	38.32	78.16
O - P	25	0.79	38.32	30.27
P - Q	25	0.4	38.32	15.33
Q - R	25	0.5	38.32	19.16
R - Depósito	25	0.4	38.32	15.33
Total		14.64		560.93

Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó el análisis de los costos asociados a los accesorios y equipos complementarios, como son codos, Tee, válvulas, manómetros y bomba centrífuga. Junto con ello, se consideraron las herramientas necesarias para la confección del sistema, como son termofusor, tijeras cortatubos y adhesivos selladores. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Cubicación y presupuesto de accesorios y equipos del sistema de medición.

Accesorios			
Tipo	Cantidad [Un]	Precio [\$/Un]	Total [Un]
Codo 90° 25 MM	19	6.28	119.32
Codo 45° 25 MM	2	13.72	27.44
Válvula de esfera 25 MM	4	170.59	682.36
Válvula Globo 25 MM	1	256.2	256.2
Pegatanke	1	157	157
Pegamento Water	1	99	99
Conector Macho	2	52.88	105.76
Reducción Bush	2	18	36
Cinta TUK Doble Capa	1	99	99
Abrazadera Everbilt	2	9.4	18.8
Mangera Surtek	1	133	133
Cinta Teflón	1	24	24
Cople 25 MM	4	9.41	37.64
Válvula de compuerta	1	257	257
Tee 25 MM	4	12.35	49.4
Termómetro	1	280.8	280.8
Termofusor	1	1512	1512
Tijeras cortatubos	1	499.02	499.02
Manómetro (carátula de aceite)	2	397	794
Bomba centrífuga Master Hardware	1	4788	4788
Total	52		9975.74

Fuente. Elaboración propia.

Con base en la información anterior, se estimó el presupuesto necesario para la construcción del sistema hidráulico de medición (ver tabla 13). Cabe mencionar que el costo final sufrió ligeras modificaciones producto de ajustes originados por inconvenientes técnicos que surgieron al momento de la construcción del sistema.

Tabla 13. Presupuesto del sistema hidráulico de medición.

Precios totales Banco hidráulico			
Accesorio	Precio (\$)	Precio (15%)	Precio Total (\$)
Tuberías	560.9	84.1	645.1
Accesorios + Bomba	9975.7	1496.4	11472.1
Precio final	10536.7	1580.5	12117.2

Fuente. Elaboración propia.

3.2.2. Cotización estructura de madera

Se efectuó la cotización de la estructura de madera destinada a soportar la red de distribución y los equipos de medición hidráulica. Dicha cotización consideró principalmente los costos de los materiales conforme a las dimensiones y especificaciones establecidas en el diseño propuesto para la estructura. Las cantidades y precios unitarios se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Presupuesto de la estructura soportante.

Detalle	Cantidad [u]	Precio [\$/u]	Precio total [\$/]
Burrito de madera 29"	2	575.00	1150.00
Ruedas	4	215.00	860.00
TRIPLAY 2.44 X 1.22 M	1	489.00	489.00
Numeración	8	33.00	264.00
Clavos 2"	1	59.00	59.00
Pintura acrílica 946 [ml] BEHR	1	305.00	305.00
Brocha	1	125.00	125.00
		Total (\$)	3252.00
		15%	487.80
		Total final (\$)	3739.80

Fuente. Elaboración propia.

3.2.3. Cotización final del sistema hidráulico de medición

Finalmente, considerando lo detallado en los incisos 3.2.1 y 3.2.2 el presupuesto total estimado para la ejecución del sistema hidráulico de medición es de **\$15.857 pesos mexicanos**. Es importante señalar que este presupuesto estuvo sujeto a modificaciones derivadas de diversos imprevistos generados durante la fase constructiva del sistema.

3.3. Construcción del sistema hidráulico

Entre las múltiples etapas del proyecto se encuentra la construcción del sistema hidráulico, desarrollada de acuerdo con el diseño previamente realizado. En esta etapa, resulta fundamental planificar y ejecutar adecuadamente los diferentes componentes del sistema de medición, ya que la manera en que se lleve a cabo su ejecución influye directamente en la precisión y confiabilidad de los resultados experimentales.

En este aspecto se estableció un método de trabajo con las distintas etapas constructivas del sistema hidráulico de medición, la cual se muestra en la figura 11.

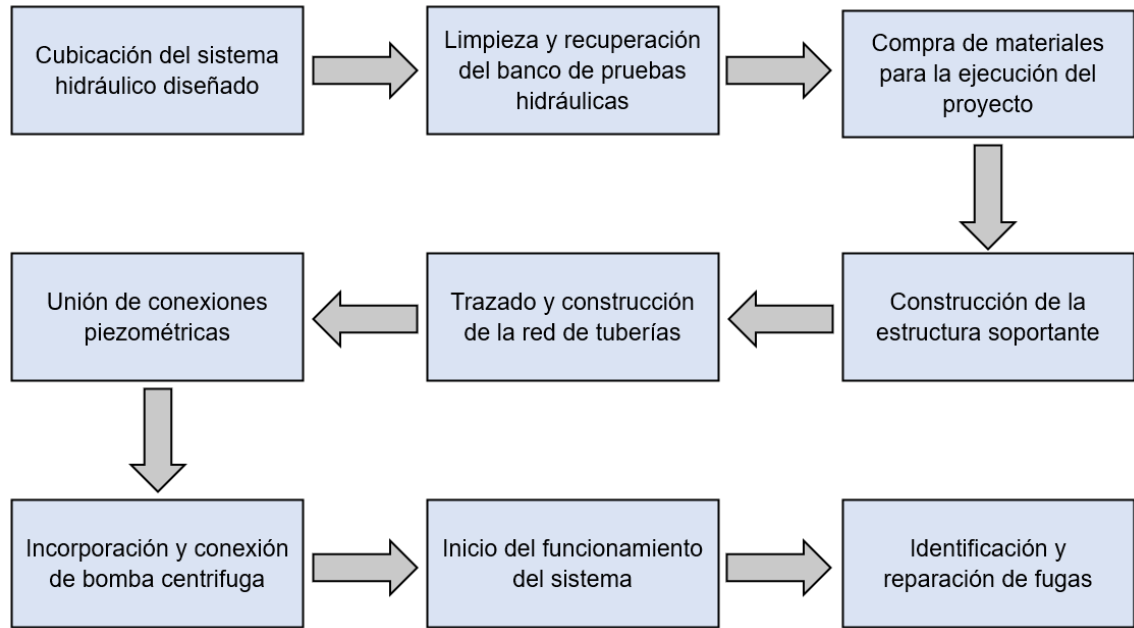


Figura 11. Diagrama de la construcción del sistema hidráulico. Elaboración propia.

3.3.1. Limpieza y recuperación del banco de pruebas hidráulico

El laboratorio de hidráulica UANL cuenta con un banco hidráulico el cual estuvo en desuso durante más de un año debido a una falla en las uniones de la bomba centrífuga. Por este motivo es que, para el desarrollo de esta investigación, no se empleó el sistema de bombeo original del banco hidráulico, sino que se aprovechó como cisterna de almacenamiento para alimentar una bomba centrífuga externa.

Para ello se realizó una limpieza en el interior y exterior del banco hidráulico, prestando especial atención con las conexiones eléctricas del sistema, como se presenta en la figura 12. Posteriormente, se procedió con el sellado de los orificios donde anteriormente se encontraban las tuberías de conexión de la bomba, con el propósito de evitar fugas en la zona de almacenamiento.

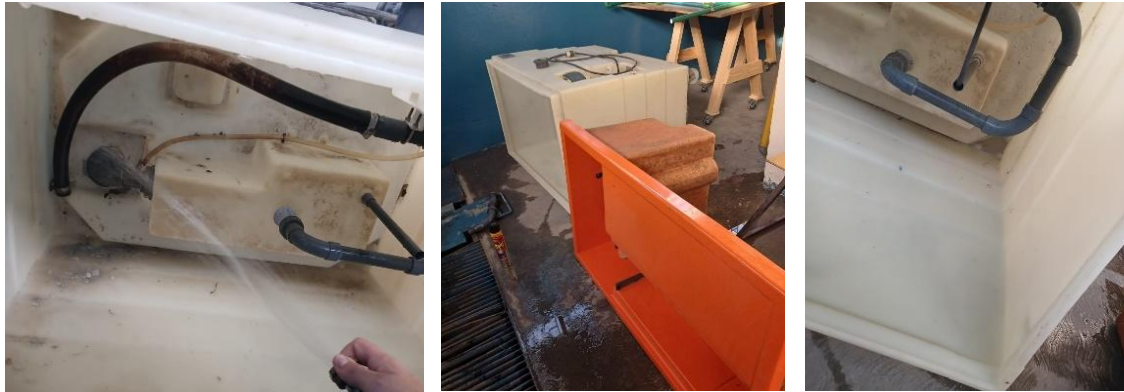


Figura 12. Limpieza del banco Hidráulico.

3.3.2. Compra de materiales para la ejecución del proyecto

Se adquirieron los materiales, accesorios y herramientas de acuerdo a lo especificado en el apartado 3.2 (ver figura 13).

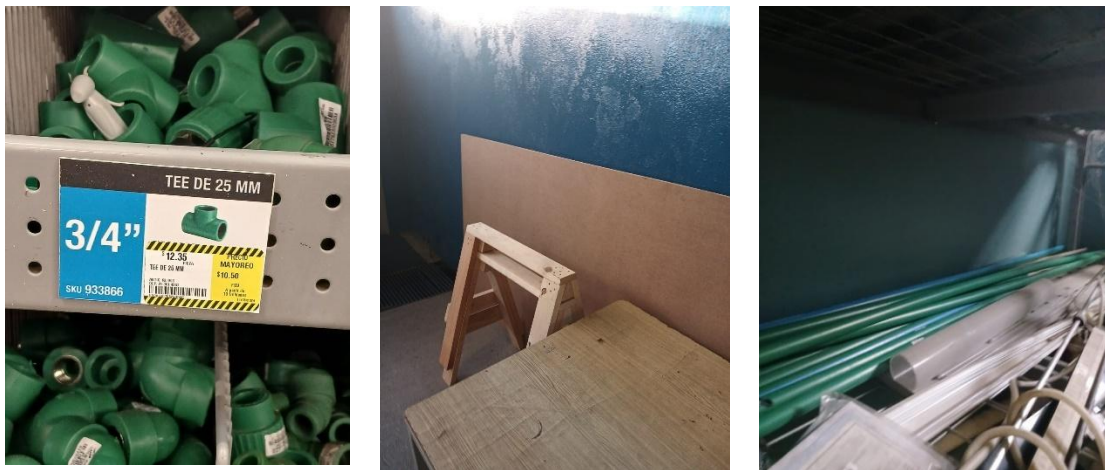


Figura 13. Compra de materiales.

3.3.3. Construcción de la estructura soportante

La construcción de la estructura soportante comenzó con la unión de las ruedas giratorias a dos caballetes de madera con una altura de 29 [pulg]. Luego, se agregó un tablero de madera triplay de 122 x 240 [cm] y 19 [mm] de espesor. Finalmente, la superficie del tablero fue recubierta con dos capas de fondo

alquidálico blanco para madera, lo que evita su deterioro por humedad y corrosión (ver figura 14).



Figura 14. Construcción de la estructura soportante.

3.3.4. Trazado y construcción de la red de tuberías

La unión de las tuberías se realizó de acuerdo al diseño planteado en el inciso 3.1.4, utilizando un termofusor de 600 [Watts] con anillos de 25 [mm] y 32 [mm]. Se comenzó con la unión de las válvulas correspondientes a cada ramal, para luego continuar con las conexiones de los tramos de la red de tuberías, como se muestra en la figura 15. En esta etapa se prestó especial atención con los cambios de dirección del ramal 3, el cual contiene los objetos en estudio.

Después de realizar la construcción principal de la red, se incorporaron los manómetros al inicio y final del sistema de medición. Estos instrumentos cuentan con una unión de $\frac{1}{4}$ de pulgada, siendo necesario utilizar bujes reductores de diámetros para su conexión con la tee de 1 [pulg]. Finalmente, se instaló una válvula esfera que permite el desagüe del agua hacia la cisterna.

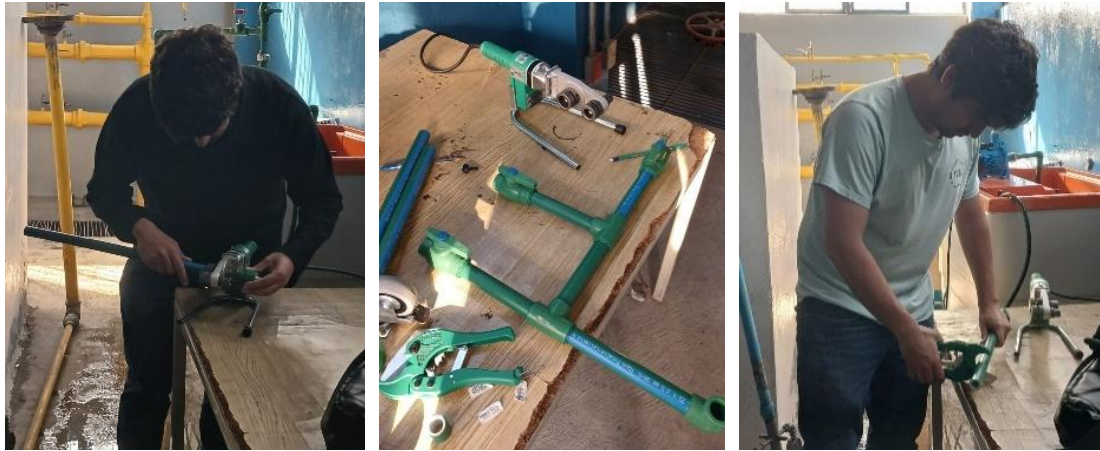


Figura 15. Unión de tuberías y accesorios.

3.3.5. Unión de conexiones piezométricas

Una vez construida la red de tuberías se realizó la instalación de los puntos de medición, los cuales están conformados por mangueras que permiten la conexión desde la tubería hasta los multipiezómetros (ver figura 16). Para esta etapa fue necesario realizar perforaciones en los puntos de mediciones de las tuberías de aproximadamente 1 [cm] de diámetro, en los cuales se insertaron mangueras de diámetro similar, permitiendo el paso de agua hacia el instrumento de medición.



Figura 16. Elaboración de los puntos de medición.

3.3.6. Incorporación y conexión de bomba centrífuga

Esta etapa fue la que más modificaciones presentó con respecto al diseño previo. En un inicio se pretendía posicionar la bomba centrífuga por debajo de la cisterna, sin embargo, por razones constructivas se decidió por agregar la bomba centrífuga en la parte superior de la cisterna. Para ello, se agregó un tramo de succión vertical equipado con una válvula de pie (o válvula de fondo) para evitar el vaciado de la tubería y por lo tanto el ingreso de burbujas de aire hacia la bomba centrífuga.

Luego, se agregaron dos tuercas unión en los puntos de entrada y salida de la bomba para sectorizar el sistema y facilitar posibles labores de mantenimiento, como se muestra en la figura 17. Finalmente, se instaló una válvula de compuerta para purgar la bomba, evitando su deterioro por el ingreso de aire al sistema. Además, se agregó una válvula de globo para controlar el caudal.



Figura 17. Posicionamiento y conexión de bomba centrífuga.

3.3.7. Correcciones del sistema terminado

Una vez concluida la construcción del sistema, se hizo una revisión integral de todo el sistema hidráulico, con el fin de verificar el correcto funcionamiento y posicionamiento de los distintos equipos que lo conforman (ver figura 18). Luego de este chequeo general, se procedió con el funcionamiento y mediciones piloto del sistema, confirmando su estabilidad inicial.



Figura 18. Correcciones del sistema hidráulico.

3.3.8. Iniciar el funcionamiento del sistema

Una vez construido todo el sistema de medición se encendió la bomba y comenzó la puesta en marcha de la red. La figura 19 presenta parte de este proceso. En esta etapa se logró evidenciar un correcto funcionamiento de la bomba centrífuga logrando presurizar por completo la red de tuberías.



Figura 19. Puesta en marcha del sistema.

3.3.9. Identificar y reparar posibles fugas

Mientras se realizaban las pruebas piloto del sistema se observaron pequeñas fugas, principalmente en las conexiones de las mangueras que unen los

multipiezómetros al resto del sistema. Estas fugas fueron reparadas aplicando pegamento sellador impermeable marca WaterWeld.

También se identificaron filtraciones en los tramos de salida de la bomba centrífuga, las cuales fueron solucionadas ajustando las tuercas unión y el buje reductor incorporado a la salida de la bomba. La figura 20 ilustra de manera general este proceso.



Figura 20. Identificación y reparación de fugas.

Con la reparación de fugas se da término a la etapa constructiva del sistema hidráulico, el cual quedó completamente operativo y funcional garantizando una correcta medición de presiones de los accesorios objetivo. Cabe destacar que se cumplieron con todas las especificaciones estipuladas en la etapa de diseño de la red de tuberías, dando paso al comienzo de la fase experimental.

3.4. Fase experimental

Tras concluir la fase constructiva del sistema hidráulico, se estableció un protocolo de operación para garantizar una correcta medición experimental. En este protocolo se establecieron dos etapas principales: A) Preparación del sistema hidráulico y B) medición, para las cuales se definieron las actividades requeridas para su operación.

La primera fase, referente a la preparación del sistema hidráulico, contempla las acciones que se deben realizar para asegurar el adecuado funcionamiento del sistema para iniciar con las mediciones. Entre los pasos a seguir se encuentran

la verificación del nivel de la cisterna, el cebado de la bomba centrífuga, la activación del sistema y la revisión de las líneas de conexión del multipiezómetros.

La segunda etapa de la fase experimental, corresponde al proceso de medición, en donde se debe habilitar el flujo según el ramal a analizar. El flujo es regulado mediante la válvula de compuerta, el cual se debe determinar según los tiempos de llenado del estanque de medición volumétrica. Luego, se registran las presiones según lo medido en el multipiezómetro y se determina el coeficiente de resistencia “K”, según las condiciones específicas de cada medición. Finalmente, se debe restablecer el sistema para comenzar con las siguientes mediciones.

Para visualizar la secuencia metodológica descrita anteriormente, se presenta la figura 21, en la cual se muestra de manera esquemática las actividades que conforman la fase experimental.

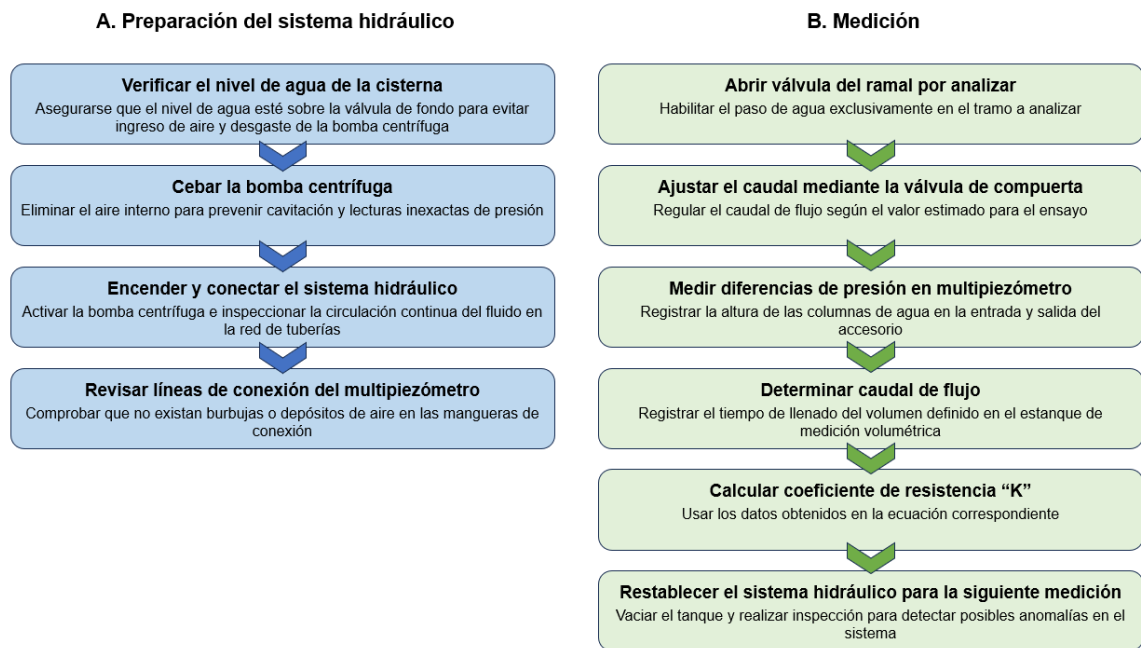


Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento de medición. Elaboración propia.

Se recabaron los primeros resultados del sistema de medición, los cuales fueron agrupados en dos conjuntos de estudio. El primer grupo considera las diferencias

de presión en los ramales 1 y 2 en presencia de un caudal específico. La disposición de los puntos de medición de estos ramales se muestra en la figura 22.



Figura 22. Disposición final del ramal 1 (punto de medición 7 y 8) y ramal 2 (punto de medición 1 y 2).

El segundo grupo de medición se centra exclusivamente en el ramal 3, el cual contiene los accesorios de interés del presente estudio, que en este caso se limitan a dos codos de 90° y dos codos de 45°, posicionados según se aprecia en la figura 23.

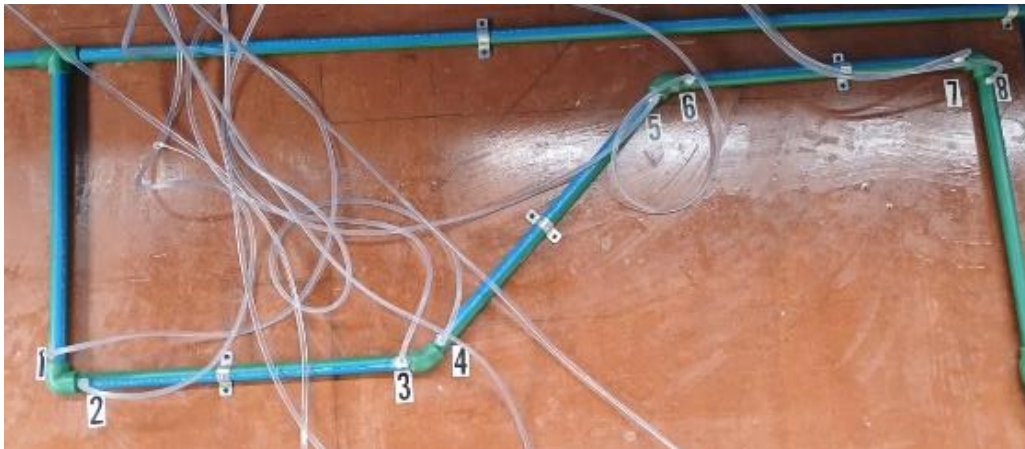


Figura 23. Disposición final del ramal 3 (punto de medición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8).

Cabe señalar que todo el sistema de medición fue construido con tuberías de PPR de 25 [mm] de diámetro nominal, realizándose los cálculos conforme a su diámetro interior de 18 [mm].

La pérdida de carga local ($h_{L, Menor}$) se determina a partir de la diferencia de presión entre la salida y la entrada de cada accesorio (ver figura 24). Reemplazando esta diferencia de presión, es decir, la pérdida de carga local en la ecuación 2.20, se obtiene el coeficiente de resistencia "K" para accesorios tipo codo de 90° y 45°, según el caudal de flujo específico analizado.

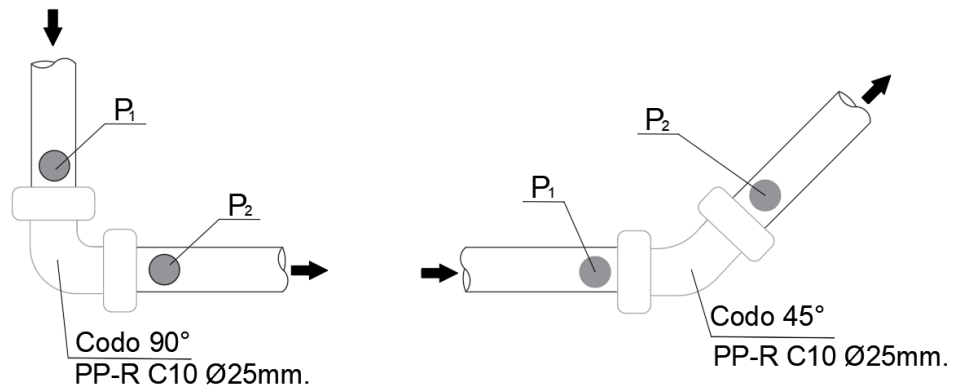


Figura 24. Ejemplo de tomas de presión para accesorios. Elaboración propia.

4. Capítulo 4: Resultados y discusiones

En el presente capítulo se encuentran los resultados experimentales obtenidos mediante el sistema hidráulico de medición especificado en el capítulo anterior. En esta sección se pretende analizar el comportamiento hidráulico de los accesorios objetivo de esta investigación, determinando los valores de los distintos parámetros fundamentales a evaluar, tales como presión, caudal, pérdida de carga y coeficiente de resistencia “K”.

Se presenta la descripción de los ensayos realizados para cada uno de los ramales del sistema, seguido del análisis de los principales resultados experimentales obtenidos. Estos resultados son comparados con referencias teóricas y antecedentes bibliográficos, con el objetivo de validar su comportamiento hidráulico y concordancia con los valores reportados por otros autores. Con ello se discuten posibles fuentes de incertidumbre de los resultados, que pudieron influir en el coeficiente de resistencia “K” de cada accesorio analizado.

De esta forma, los resultados que aquí se presentan establecen la base para la formulación de ecuaciones representativas para el cálculo del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo para accesorios tipo codos de 90° y 45°, los cuales son el principal objeto en estudio de esta investigación.

En este contexto, se recabaron datos para los tres ramales del sistema hidráulico. Para ello se separó en 2 grupos de estudio. El primero considera las diferencias de presiones del ramal 1 y 2 ante un caudal específico. Mientras que para el segundo grupo de medición se consideró solo el ramal 3, el cual contiene los objetos de estudio de la investigación.

Finalmente, es importante señalar los valores utilizados para los cálculos efectuados: aceleración de gravedad $g = 9.80665 \left[\frac{m}{s^2}\right]$, diámetro interior $D = 18 \text{ [mm]}$ y área de la sección transversal $A = 0.00025447 \text{ [m}^2\text{]}$.

4.1. Ramal 1 y 2: Conjunto de codos y tramo longitudinal

Con el objetivo de comparar las pérdidas de cargas generadas en un tramo recto de tubería con las ocurridas en los accesorios, se realizaron mediciones experimentales en el ramal 1 y 2 del sistema hidráulico. Si bien estos ramales no permiten determinar de forma directa las pérdidas de cargas de cada accesorio en estudio, sí permiten evidenciar la relevancia de la magnitud de presión que se pierde en los elementos de cambio de dirección.

Los tramos 1 y 2 presentan las siguientes características:

- **Primer ramal de medición:** Está conformada por ocho codos de 90°, dispuestos de manera continua con puntos de medición en los extremos del conjunto de codos. Este tramo permite determinar la pérdida de carga total generada por los 8 codos en conjunto. La longitud total medida en este tramo es de 62 [cm].
- **Segundo ramal de medición:** Corresponde a un tramo longitudinal de tubería de 62 [cm], con puntos de medición en sus extremos.

Se realizaron un total de 18 mediciones para cada ramal, es decir, para el ramal 1 (conjunto de codos) y ramal 2 (tramo longitudinal). Las mediciones se realizaron variando el caudal, bajo un régimen de flujo turbulento, como se muestra la tabla 15. De este modo se evidencian las pérdidas de presión generadas en cada ramal con el fin de compararlas la diferencia de pérdida de carga entre ambos, como se observa en la figura 25.

Tabla 15. Resultado tanda de medición del ramal 1 y 2

Medición	T°	Caudal [L/min]	Velocidad [m/s ²]	N° de Reynolds	Flujo	Ramal 1			Ramal 2		
						Punto de lectura [mm]		Diferencia [m]	Punto de lectura [mm]		Diferencia [m]
						8	7		2	1	
1	30.0	13.003	0.852	19090.51	Turbulento	316	-15	0.331	52	14	0.038
2	30.0	15.425	1.010	22646.91	Turbulento	400	-30	0.430	55	10	0.045
3	30.0	13.781	0.903	20232.23	Turbulento	125	-195	0.320	-140	-165	0.025
4	30.0	15.941	1.044	23403.98	Turbulento	415	-15	0.430	75	35	0.040
5	32.6	16.753	1.097	24595.42	Turbulento	415	-20	0.435	47	-15	0.062
6	32.8	15.656	1.025	22985.65	Turbulento	335	-102	0.437	-7	-35	0.028
7	33.1	15.170	0.994	22272.21	Turbulento	210	-180	0.390	-95	-130	0.035
8	33.2	13.689	0.897	20098.19	Turbulento	88	-252	0.340	-180	-212	0.032
9	33.5	13.312	0.872	19544.03	Turbulento	17	-297	0.314	-232	-260	0.028
10	33.9	12.565	0.823	18446.79	Turbulento	-80	-358	0.278	-297	-323	0.026
11	34.1	14.934	0.978	21925.65	Turbulento	160	-210	0.370	-130	-162	0.032
12	31.2	16.085	1.053	23614.69	Turbulento	388	-65	0.453	30	-15	0.045
13	31.3	14.402	0.943	21144.84	Turbulento	172	-194	0.366	165	130	0.035
14	31.8	16.026	1.050	23527.87	Turbulento	402	-55	0.457	42	0	0.042
15	32.2	13.472	0.882	19778.93	Turbulento	7	-308	0.315	-242	-271	0.029
16	32.4	12.226	0.801	17949.82	Turbulento	-125	-383	0.258	-305	-330	0.025
17	32.6	10.511	0.688	15432.17	Turbulento	-321	-514	0.193	-462	-489	0.027
18	32.8	8.439	0.553	12390.10	Turbulento	-516	-635	0.119	-602	-615	0.013

Fuente. Elaboración propia.

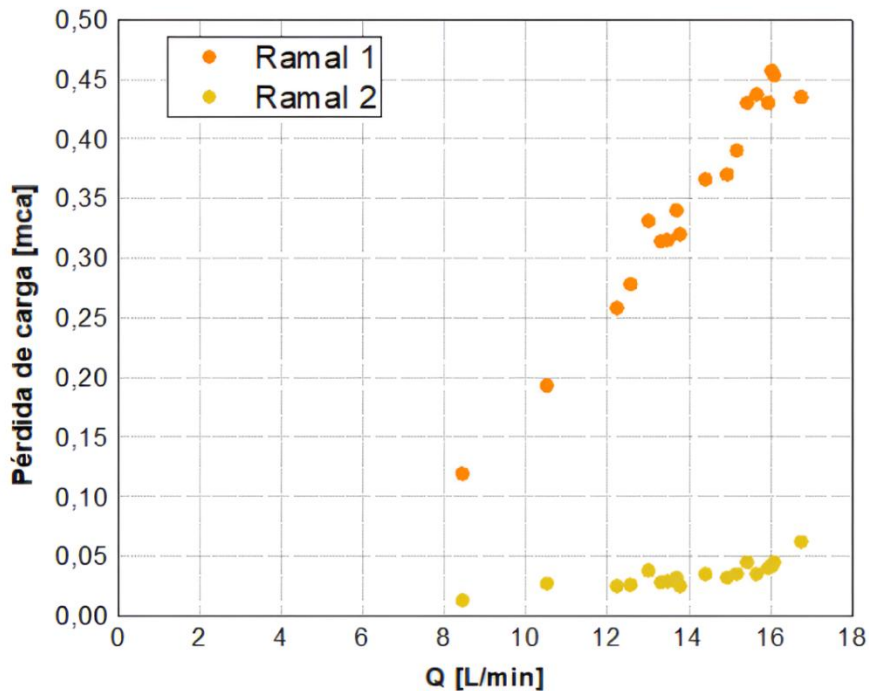


Figura 25. Diferencias de presión entre el ramal 1 y 2. Elaboración propia.

Mediante la figura 25 se observa que las pérdidas de carga generadas por el conjunto de codos (ramal 1) son considerablemente mayores que las registradas

en tramos longitudinales (ramal 2). Los resultados de ambos ramales muestran que la diferencia entre sus pérdidas incrementa a medida que aumenta el caudal de flujo.

En el caso del ramal 1, las pérdidas de cargas aumentan a mayor caudal, alcanzando valores cercanos a los 0.45 [mca] para caudales cercanos a los 17 [l/min]. Estas pérdidas elevadas se explican por la acumulación de perturbaciones generadas por la presencia de varios codos consecutivos, lo que intensifica la disipación de energía en comparación con los tramos longitudinales.

En el ramal 2 se presentan pérdidas de carga sustancialmente menores que en el ramal 1, siendo estas del orden de 0.05 [mca] para caudales de 17 [l/min]. También se evidencia que las pérdidas de carga en tramos longitudinales de tuberías son menos sensibles a las variaciones de caudal en comparación con las ocurridas en accesorios, lo cual se relaciona a que estas pérdidas son producidas principalmente por efectos friccionales entre las paredes interiores de las tuberías con las partículas de agua.

Estos resultados evidencian la importancia de considerar, no solo la longitud de la tubería en el cálculo hidráulico, sino que también el tipo, disposición y cantidad de accesorios, debido a las grandes pérdidas de cargas que se generan. Ignorar los efectos asociados a los codos induce a una subestimación de las pérdidas totales de presión del sistema, derivando en errores del cálculo hidráulico y dimensionamiento de los equipos utilizados en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

4.2. Ramal 3: Accesorios objetivo

Se recopilieron los resultados para los cuatro accesorios en estudio del ramal 3, los cuales fueron organizados en dos conjuntos de mediciones. Esta clasificación, se realizó luego de identificar, durante un análisis preliminar, una tendencia atípica en los resultados asociados al primer codo de 90°, lo cual compromete la validez y representatividad de los datos iniciales.

El primer conjunto o set de medición, se conformó con 97 registros (ver anexo A), correspondientes a las mediciones iniciales realizadas antes de la detección de dicha anomalía. El segundo conjunto incluyó 109 mediciones (ver anexo B), obtenidas posteriormente a la corrección del sistema hidráulico, con el fin de verificar la consistencia de los datos y validar los resultados obtenidos.

Es importante señalar que no todas las mediciones consideraron un registro en simultaneo de los cuatro accesorios en análisis. Por ello, al momento de generar las gráficas del coeficiente de resistencia en función del caudal, la cantidad de datos disponibles para cada accesorio varía según las mediciones efectivamente realizadas.

4.2.1. Primer set de mediciones

Se analizaron los datos correspondientes al primer set de mediciones, los cuales nos entregaron tendencias preliminares de los coeficientes de resistencias asociados a los accesorios de cambio de dirección. El análisis inicial del primer set contribuyó a identificar fallas imperceptibles a inspección visual, lo que permitió una corrección posterior del sistema hidráulico.

A continuación, se presentan las gráficas que relacionan el coeficiente de resistencia “K” con el caudal de flujo para los accesorios tipo codo de 90° y 45°, con el objetivo de examinar el comportamiento hidráulico y la tendencia de los valores de K frente a las variaciones del caudal de flujo. Las mediciones realizadas para cada accesorio del ramal 3, se efectuaron de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 3.4 y consideraron caudales de flujo entre 9 [L/min] y 24 [L/min].

La figura 26 muestra los valores obtenidos del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo para los codos de 90° correspondientes al primer set de mediciones. Ambos accesorios analizados poseen las mismas características geométricas y la misma longitud de desarrollo del fluido previo al cambio de dirección. Por ende, la rugosidad de la tubería, el diámetro interior de la tubería y

las velocidades del fluido son idénticos, por lo que se espera que los valores de "K" presenten valores y un comportamiento similar entre sí.

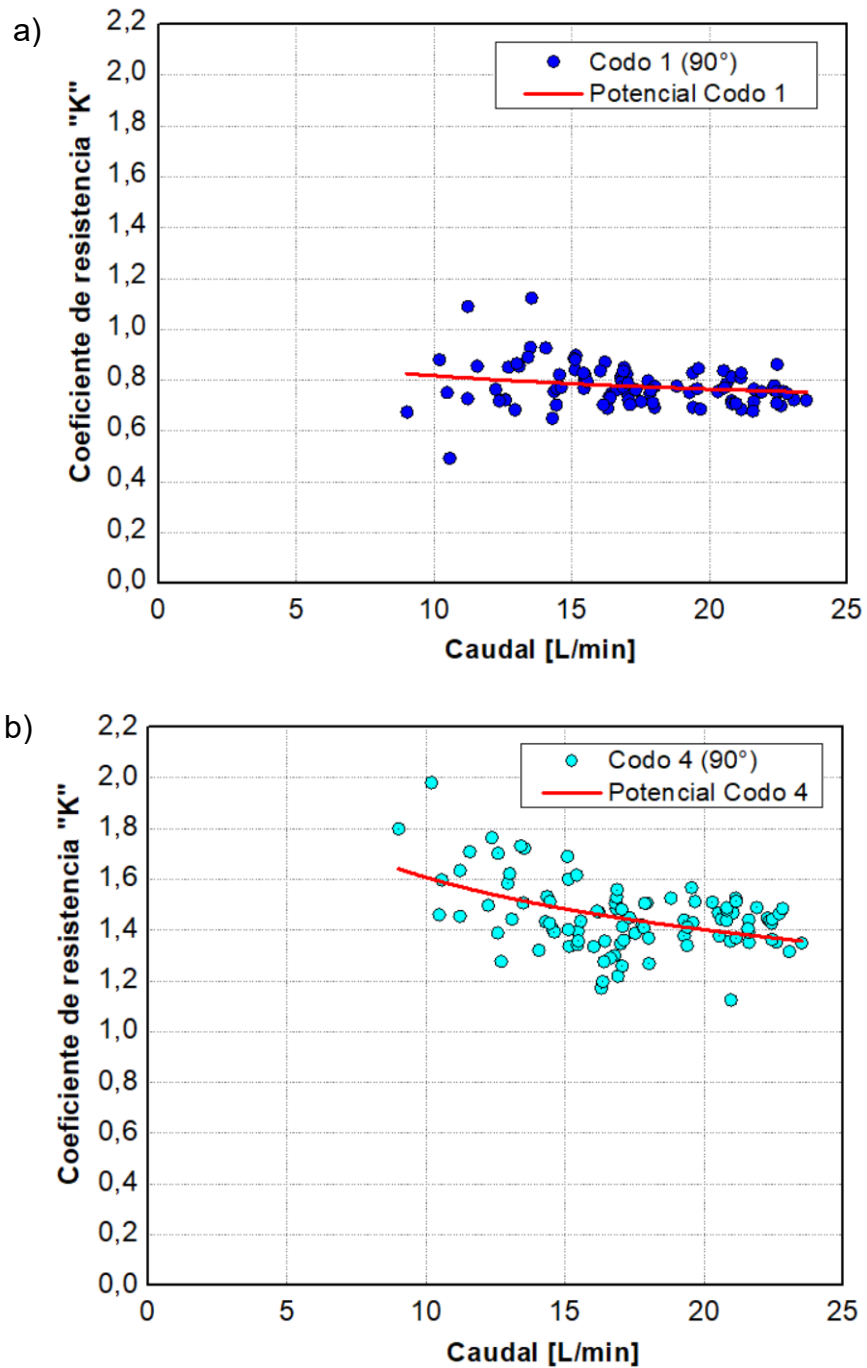


Figura 26. Resultados del primer set de mediciones para codos de 90°. a) Primer codo y b) Cuarto codo.

A partir de los resultados presentados en la figura 26 (a), relacionados al primer codo, se observa que los valores del coeficiente de resistencia K se concentran mayoritariamente entre 0.6 y 1.0, con un promedio de 0.78. Estos valores son menores que las reportadas en la literatura para accesorios de iguales características. Además, se identificó una ligera tendencia decreciente de K a medida que aumenta el caudal de flujo.

En el caso del codo 4, correspondiente al segundo codo de 90° (figura 26 (b)), los valores de K se registraron principalmente entre 1.2 y 1.8, con un promedio de 1.45. También se observa una tendencia potencialmente decreciente a medida que aumenta el caudal de flujo. A diferencia de los resultados obtenidos para el primer codo de 90° , estos resultados concuerdan con los reportados por la literatura, lo que representa un comportamiento hidráulico más representativo según las condiciones trabajadas.

Al comparar los valores obtenidos para ambos codos de 90° , se observa una diferencia significativa en los valores de K , a pesar de que ambos accesorios presentan características geométricas y condiciones de operación idénticas. Esta discrepancia se atribuyó a un error en la confección del sistema, lo cual fue corroborado posteriormente con la identificación de una obstrucción de la línea de conducción del primer codo, entre el punto de medición y el multipiezómetro. Dicha obstrucción generaba una disminución de la sección transversal y, por lo tanto, variaciones anómalas de las presiones.

Por otro lado, la figura 27 muestra los coeficientes de resistencia “ K ” en función del caudal de flujo obtenidos para los codos de 45° , correspondientes al primer set de mediciones. De forma análoga a los resultados de los codos de 90° , estos accesorios cuentan con características, propiedades y condiciones hidráulicas idénticas, por lo que los valores de K deberían mostrar concordancia entre ambos.

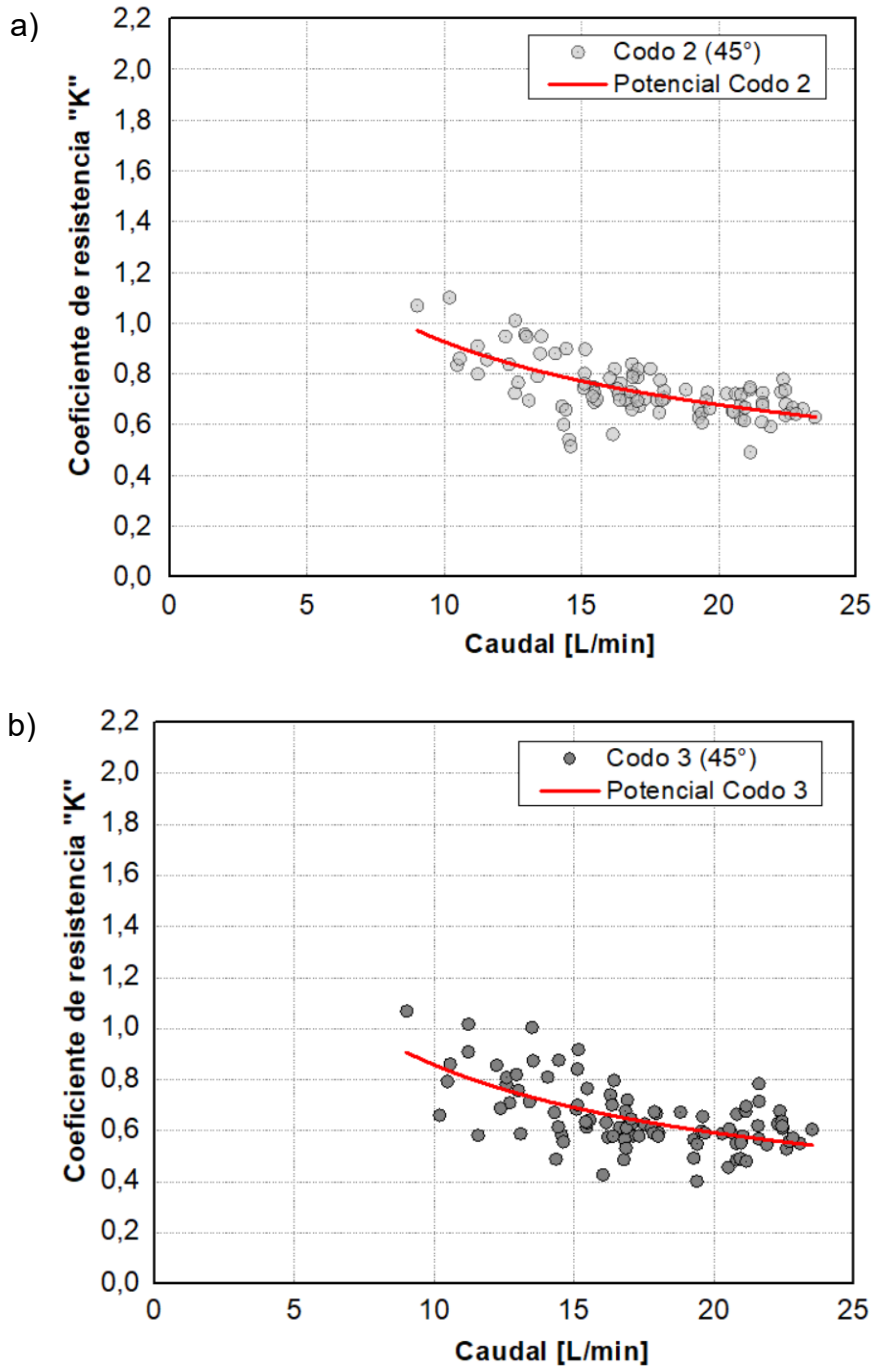


Figura 27. Resultados del primer set de mediciones para codos de 45°. a) Segundo codo y b) Tercer codo.

Mediante los resultados experimentales obtenidos para los codos de 45°, se observa tendencias similares en ambos codos en análisis, caracterizándose por presentar una relación potencialmente decreciente para K en función del caudal de flujo. Los valores de K se encuentran mayoritariamente en un intervalo entre

0.5 y 0.9, siendo inferiores a los coeficientes asociados a codos de 90°, lo cual coincide con los valores reportados en la literatura para codos de 45°.

A pesar que ambos accesorios presentan curvas potenciales similares, se evidencia una mayor dispersión de datos relacionados al codo 3, lo que se puede atribuir a pequeñas irregularidades en la confección del sistema o a fluctuaciones en el comportamiento del flujo.

Las similitudes de los resultados de la figura 27 para ambos codos de 45°, respalda la validez y confiabilidad de la experimentación efectuada, a diferencia de lo ocurrido en el primer set de medición para codos de 90°. Esto permite confirmar que el sistema operó de manera adecuada durante la experimentación y que los valores obtenidos son representativos según el comportamiento hidráulico de estos accesorios.

4.2.2. Segundo set de mediciones

Luego del análisis del primer set de mediciones, se identificó una tendencia atípica en el comportamiento del primer codo de 90° evaluado, lo que se evidenció la necesidad de corregir el sistema experimental. Durante la revisión del sistema se detectó una obstrucción en el punto de medición, específicamente en la manguera que conectaba la toma de presión ubicada en la entrada del accesorio. Esta situación generaba un registro incorrecto de la presión de entrada del accesorio, siendo este menor al real. En consecuencia, se estaba subestimando la pérdida de carga en el accesorio, lo que resultaba en coeficientes de resistencia menores en comparación con el segundo codo de iguales características hidráulicas y geométricas.

Para su corrección, se reemplazó el accesorio afectado y se reinstalaron las conexiones de las tomas de presión, prestando especial cuidado en evitar obstrucciones en la manguera que conecta el sistema de tuberías con el multipiezómetro.

Una vez realizados los ajustes, y siguiendo la misma metodología utilizada para el primer set, se procedió a realizar las mediciones del segundo set, con el fin de

verificar la similitud entre ambos codos de 90°, en donde se consideró un mayor rango de caudales siendo estos entre 4 [L/min] y 29 [L/min]. Los resultados obtenidos para los codos de 90° se muestran en la figura 28.

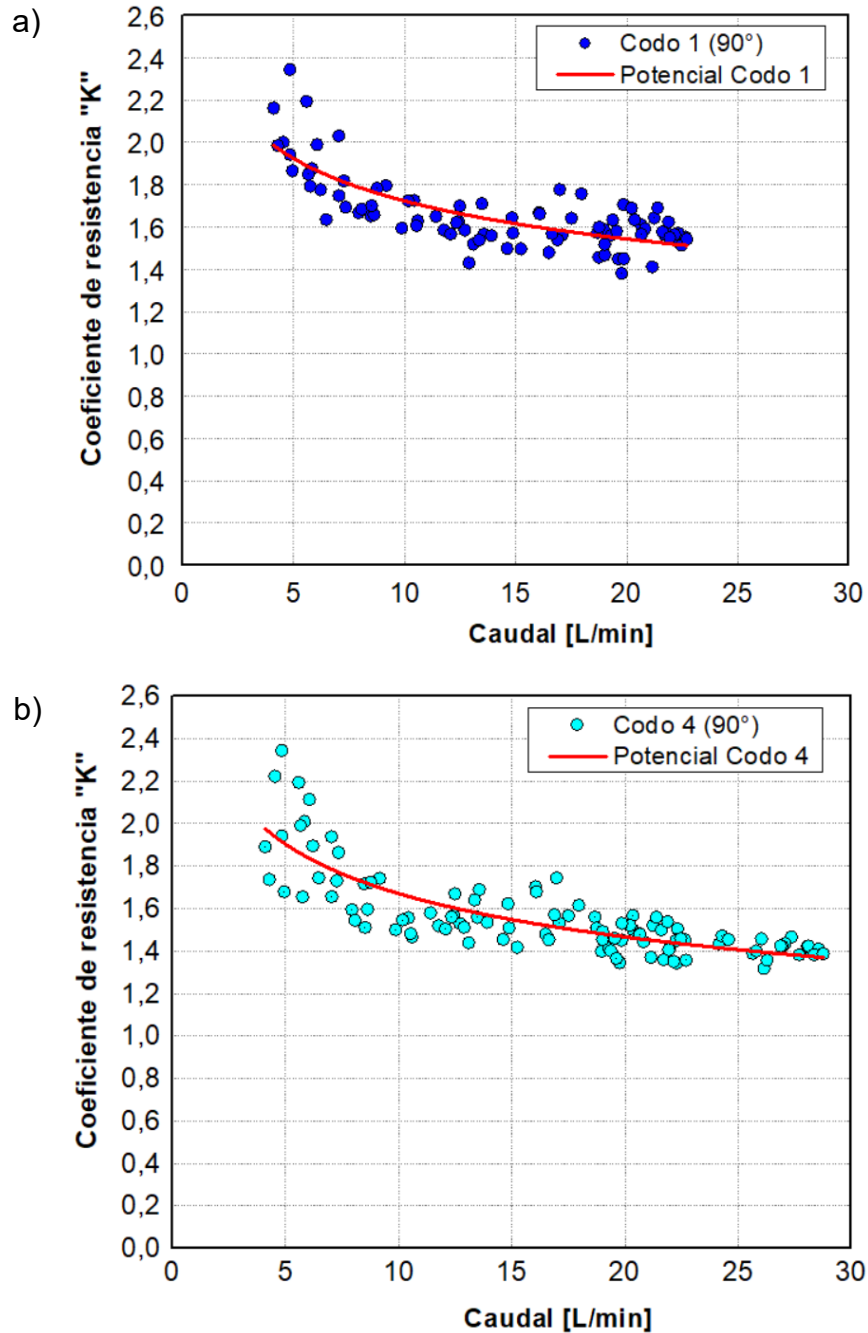


Figura 28. Resultados del segundo set de mediciones para codos de 90°. a) Primer codo y b) Cuarto codo.

Los resultados obtenidos para ambos codos de 90° en el segundo set de mediciones, muestran valores del coeficiente de resistencia K similares, con la diferencia de que en el codo 4 se registraron caudales mayores. En ambos casos los valores de K oscilan entre 1.4 y 2.0, obteniéndose un valor promedio de 1.65 para el codo 1, con un caudal promedio de 14.5 [L/min]. Mientras que para el codo 4 se obtuvo un valor promedio de 1.56, con un caudal de 16.8 [L/min]. La disminución determinada en el coeficiente de resistencia del codo 4 se debe a la relación inversa que existe entre K y el caudal de flujo, ya que mayores caudales tienden a provocar menores coeficientes de resistencias.

Junto con ello, se identifica una tendencia potencialmente decreciente del coeficiente de resistencia K , lo cual es consistente con los valores determinados para el codo 4 en el primer set de mediciones. Esta similitud respalda los resultados experimentales obtenidos para el codo 4 en el primer set de medición y se confirma que las perturbaciones del flujo asociadas a los errores en la construcción del sistema hidráulico, generaban coeficientes de resistencia no representativos al comportamiento real del flujo en el accesorio.

La figura 29 presenta los valores obtenidos para el coeficiente de resistencia “ K ” en función del caudal de flujo para codos de 45° , luego de la reparación realizada en el sistema hidráulico. Si bien estas modificaciones efectuadas no afectan directamente a los codos de 45° , se repitieron las mediciones con el objetivo de corroborar su estabilidad en el comportamiento hidráulico y detectar posibles variaciones con respecto a los resultados obtenidos en el primer set.

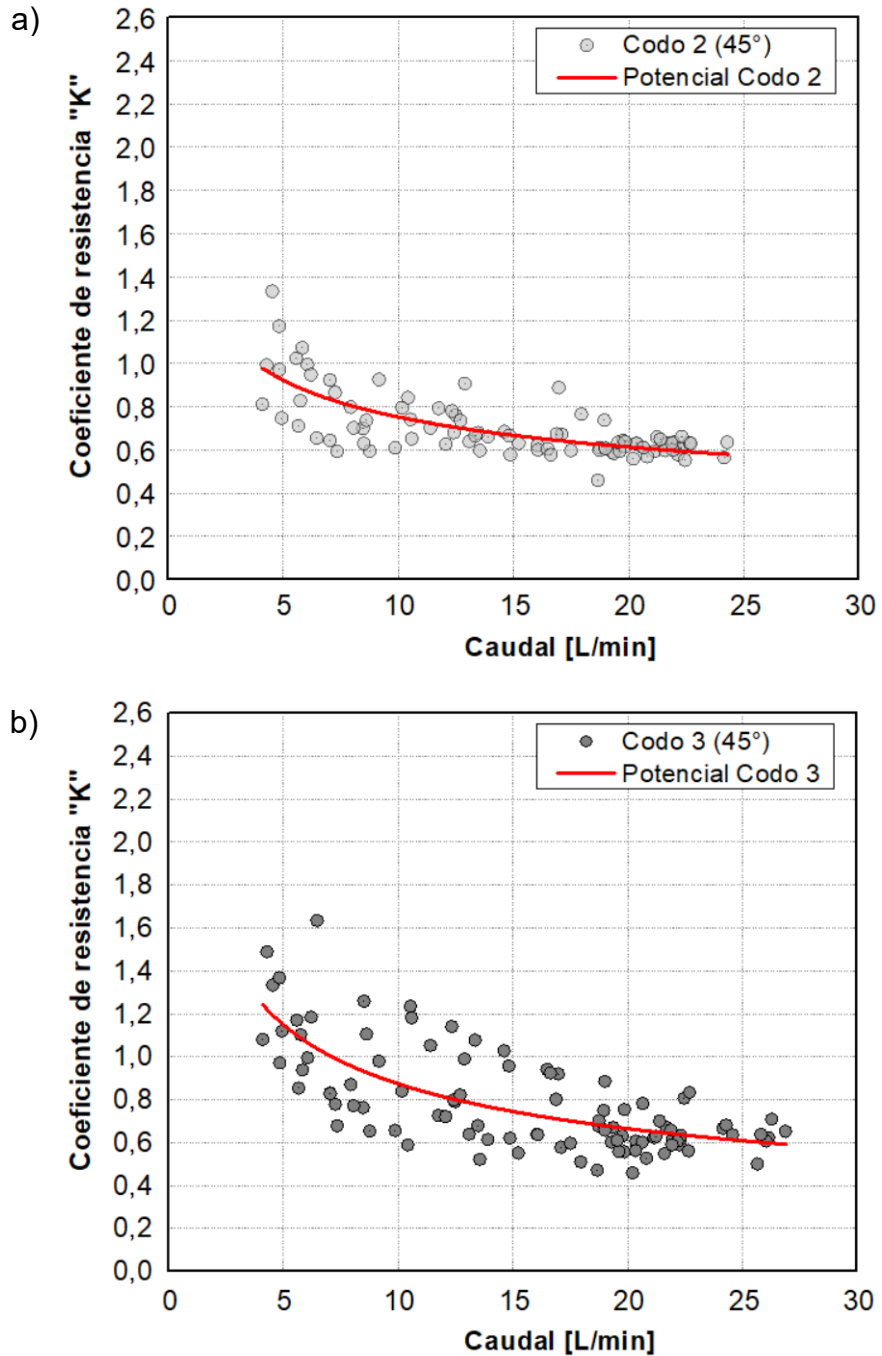


Figura 29. Resultados del segundo set de mediciones para codos de 45°. a) Segundo codo y b) Tercer codo.

Los resultados presentados en la figura 29 muestran los valores obtenidos para ambos codos de 45° analizados, donde se realizaron mediciones con un rango de caudal mayor en comparación con el primer set de mediciones. En este caso, los valores del coeficiente de resistencia son similares entre los codos 2 y 3, con

un valor promedio de K de 0.73 y 0.65, respectivamente, para un caudal promedio de 17.2 [L/min] en ambos accesorios.

En ambos casos se identifica una tendencia potencialmente decreciente del coeficiente de resistencia en función del caudal, lo que concuerda con el comportamiento hidráulico registrado en el primer set de medición para codos de 45°.

Además, se aprecia una mayor dispersión en los datos correspondientes al codo 3 en comparación con el codo 2, lo cual se atribuye a la redistribución del flujo luego de haber pasado por el codo anterior, lo que provoca fluctuaciones en la columna de agua registrada en el multipiezómetro y, por ende, genera incertidumbre en la medición de presión del accesorio.

4.3. Ecuación del coeficiente de resistencia “K”

Con el propósito de obtener una ecuación representativa del coeficiente de resistencia “K”, se integraron los valores obtenidos en ambos conjuntos de mediciones, generando una expresión para los codos de 90° y otra para los codos de 45°, considerando en todos los casos un diámetro nominal de 25 [mm].

En el caso específico de los codos de 90°, se descartaron los resultados del primer codo evaluado en el primer set de mediciones, ya que presentaban errores asociados a la obstrucción del ducto de conexión piezométrica, comprometiendo la validez de estos resultados.

De esta forma, el análisis final consideró un total de 295 mediciones para codos de 90° y 382 mediciones para codos de 45°. Los datos recabados permitieron establecer una relación práctica entre el coeficiente de resistencia “K” y el caudal de flujo para ambos accesorios en estudio.

4.3.1. Codo 90°

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se recabaron los datos que permitieron relacionar el coeficiente de resistencia “K” con el caudal de flujo como se muestra en la figura 30.

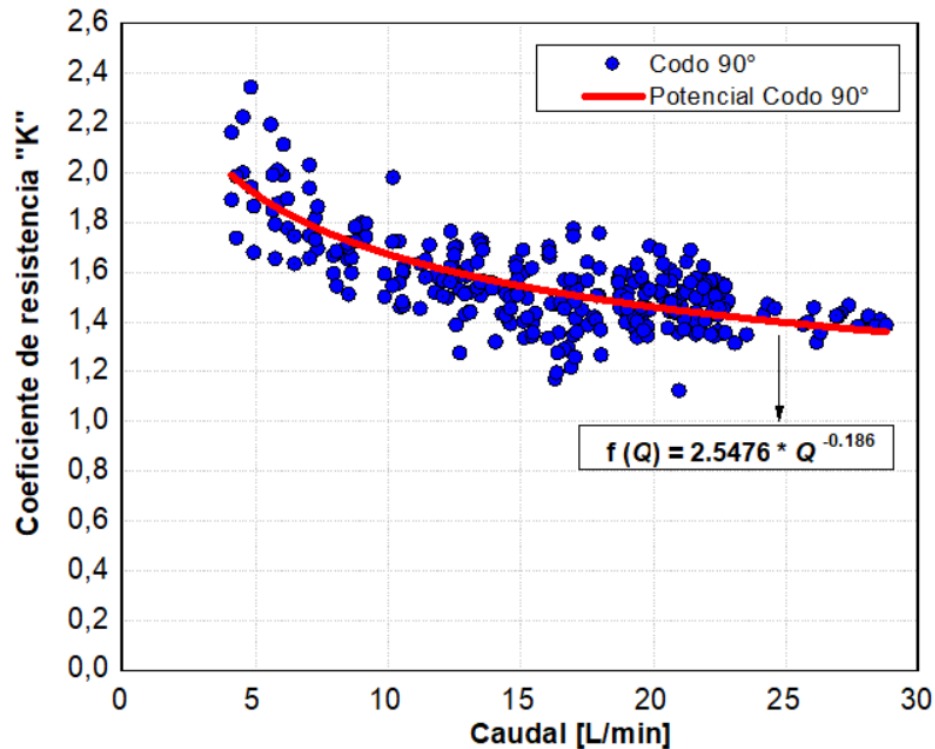


Figura 30. Comportamiento del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo en codo de 90°. Elaboración propia.

A través de los resultados experimentales recabados para codos de 90°, se consolida una tendencia potencialmente decreciente del coeficiente de resistencia K en función del caudal de flujo, por ende, ante mayores caudales de trabajo se tendrán menores coeficientes de resistencia.

El valor promedio del coeficiente de resistencia K, considerando velocidades entre 0.27 y 1.9 [m/s], equivalentes a caudales de 4 [l/min] y 29 [L/min] para un diámetro interior de 18 [mm], respectivamente, fue de 1.55. Dicho valor es consistente con los resultados reportados por el catálogo técnico de Rotoplas

referente al accesorio en análisis, lo que valida las mediciones experimentales realizadas.

Considerando el ajuste potencial se obtuvo la ecuación para calcular el coeficiente de resistencia en codos de 90° en función del caudal de flujo, la cual se representa mediante la ecuación 4.1.

$$f(Q) = 2.5476 * Q^{-0.186} \quad (\text{Ecc. 4.1})$$

Donde, “Q” corresponde al caudal de flujo medido en [L/min].

La ecuación 4.1 presenta una constante de proporcionalidad de 2.5476 y un exponente de -0.186, lo que define la relación de decrecimiento entre el coeficiente y el caudal. El exponente negativo, demuestra que el coeficiente de resistencia no disminuye de forma lineal, si no que decrece a un ritmo variable.

Es importante mencionar que la reducción del coeficiente de resistencia conforme aumenta el caudal, no implica que las pérdidas de carga local también disminuyan. Por el contrario, la pérdida de carga continúa incrementando, debido a que, en la ecuación general de pérdida de carga menor la velocidad se encuentra elevada al cuadrado (ver ecuación 2.19). Es por ello que aun cuando K presente una tendencia decreciente, el aumento de la velocidad producto de caudales mayores, genera un incremento de las pérdidas de carga en este tipo de accesorios. Por lo tanto, lo que realmente ocurre es que la tasa de crecimiento de las pérdidas locales es menor debido a la disminución de K.

4.3.2. Codo 45°

En el caso de los codos de 45° se recabaron un total de 382 mediciones experimentales, considerando velocidades entre 0.27 [m/s] y 1.77 [m/s], correspondientes a 4 [l/min] y 27 [l/min], respectivamente. Mediante estos datos se trazó una línea de tendencia mostrada en la figura 31, la cual permitió obtener una ecuación de la curva representativa del coeficiente de resistencia en función del caudal de flujo para codos de 45°.

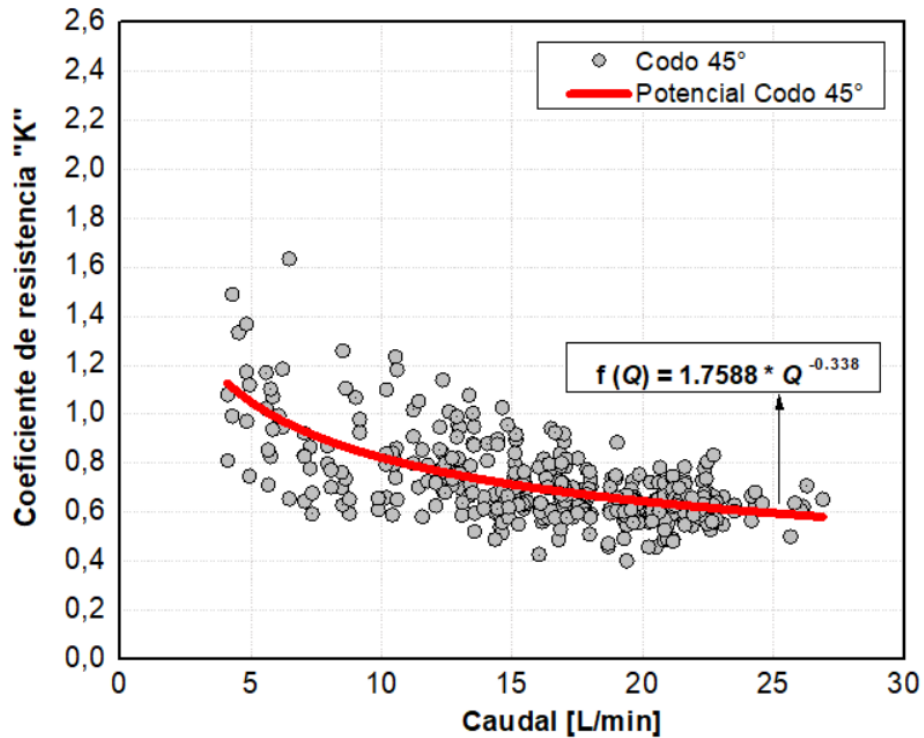


Figura 31. Comportamiento del coeficiente de resistencia “K” en función del caudal de flujo en codo de 45°. Elaboración propia.

La gráfica de la figura 31 evidencia que, al igual que en codos de 90°, el comportamiento de K sigue una tendencia potencialmente decreciente a medida que aumenta el caudal. El valor promedio del coeficiente de resistencia fue de 0.72, siendo mayor que los valores reportados por la literatura para codos de 45°. Sin embargo, ante caudales mayores los resultados experimentales de K toman valores bastante similares a la reportadas por otras referencias.

A partir de este ajuste de los valores experimentales, se representó el comportamiento hidráulico experimental de manera matemática mediante la siguiente ecuación.

$$f(Q) = 1.7588 * Q^{-0.338} \quad (\text{Ecc. 4.2})$$

Donde, “Q” es el caudal de flujo medido en [L/min].

Esta ecuación presenta una constante de proporcionalidad de 1.7588, la cual es menor a la presentada para codos de 90°, indicando que en codos de 45° el

coeficiente toma valores menores y, por ende, generan menores pérdidas de carga locales. También se observa un exponente de -0.338, el cual es menor que el correspondiente al codo de 90°, lo que indica que la disminución del coeficiente de resistencia con el aumento del caudal es más abrupta en codos de 45°, es decir, es más sensible a la variación del caudal.

Estos resultados evidencian que la geometría del accesorio influye directamente en la magnitud de la pérdida de carga menor. Para accesorios con ángulos más abiertos, como son los codos de 45°, se generan perturbaciones menores del flujo, lo que se refleja en valores más bajos del coeficiente de resistencia. Por el contrario, en accesorios con ángulos más cerrados, como en codos de 90°, el cambio de dirección abrupto provoca una mayor fricción entre las partículas de agua y las paredes interiores del accesorio, además de un incremento en la turbulencia del flujo y, por ende, valores más elevados del coeficiente de resistencia.

4.3.3. Intervalo de confianza

Se realizó el cálculo de un intervalo de confianza para los datos experimentales obtenidos. Esto permite tener referencia de la incertidumbre de las mediciones, siendo este el rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor verdadero con un 95% de confianza. Para ello, se puede obtener el valor residual, es decir, la diferencia entre el valor experimental obtenido y el calculado con la línea de tendencia, lo cual permite obtener la desviación estándar (σ) como muestra la ecuación 4.3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Ecc. 4.3})$$

Donde, "n" es el número de muestras, " x_i " es el valor experimental obtenido y " \bar{x} " el valor medio derivado de la línea de tendencia de los resultados.

Para el intervalo de confianza, se considera la ecuación 4.4.

$$I.C = \bar{x} \pm z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ecc. 4.4})$$

Donde, “ $z_{\alpha/2}$ ” depende del nivel de confianza.

Para determinar el intervalo de confianza con un nivel de 95 %, se obtuvo el valor crítico “ $z_{\alpha/2}$ ” correspondiente a una probabilidad acumulada de 0.975, cuyo valor es de **1.96**. Este valor se obtuvo mediante la tabla de probabilidades acumuladas reportadas por Anderson, Sweeney y William en *Estadística para administración y economía* (ver anexo C) [25]. Para los demás factores se consideraron los valores mostrados en el Anexo D y E. La figura 32 y 33 muestran de forma gráfica el intervalo de confianza del 95% para los accesorios tipo codo de 90° y 45°, respectivamente.

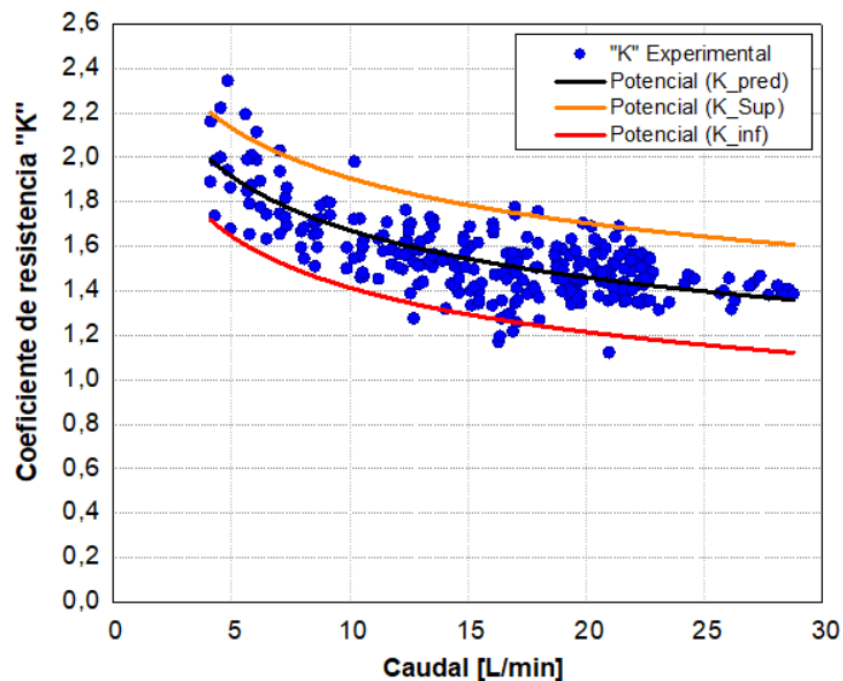


Figura 32. Intervalo de confianza para coeficiente de resistencia en función del caudal en codos de 90°. Elaboración propia

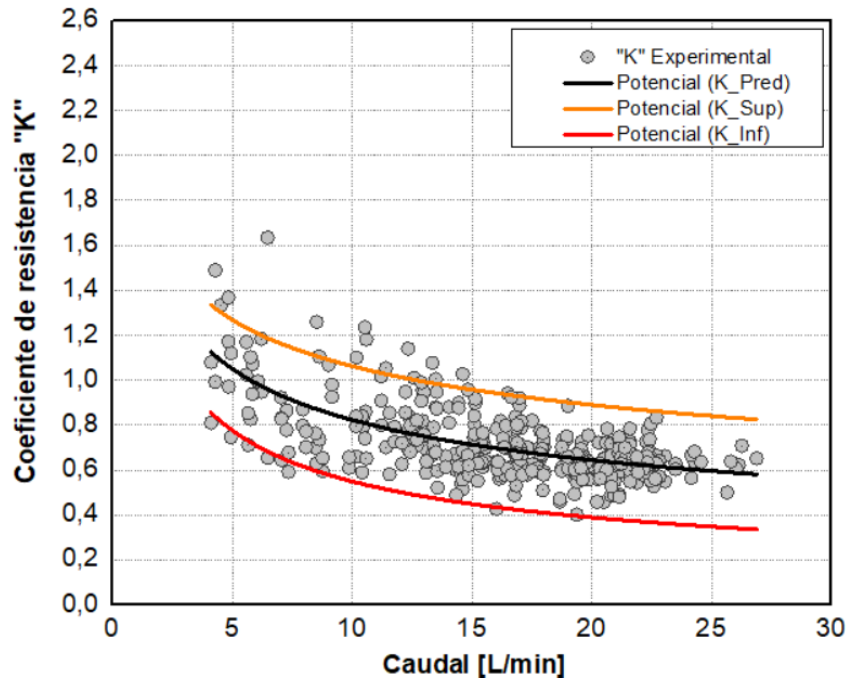


Figura 33. Intervalo de confianza para coeficiente de resistencia en función del caudal en codos de 45°. Elaboración propia

Los resultados mostrados en la figura 33 y 34, muestran el rango en que se espera encontrar el valor verdadero del coeficiente de resistencia con un 95% de confianza. Con estos resultados se observan que los codos de 45° poseen una mayor desviación estándar en comparación con los resultados obtenidos para codos de 90° (0.128 y 0.125, respectivamente). Esta diferencia implica que los codos de 45° tienen un intervalo de confianza más amplio y, por ende, una menor concentración de datos cerca del valor promedio, en comparación con los codos de 90°.

También se observa que los valores de K tienen una menor dispersión a medida que aumenta el caudal para ambos accesorios, lo que representa una mayor confiabilidad en el comportamiento del coeficiente ante caudales elevados.

4.4. Comparación de valores del coeficiente de resistencia “K”

Los resultados obtenidos se compararon con los valores de coeficiente de resistencia “K” reportados en la bibliografía referenciada para los accesorios en estudio de diámetro 25 [mm] (ver figura 34 y 35), evidenciando que los resultados obtenidos de forma experimental se encuentran dentro de rangos coherentes según lo establecido por otros autores, catálogos y normativas.

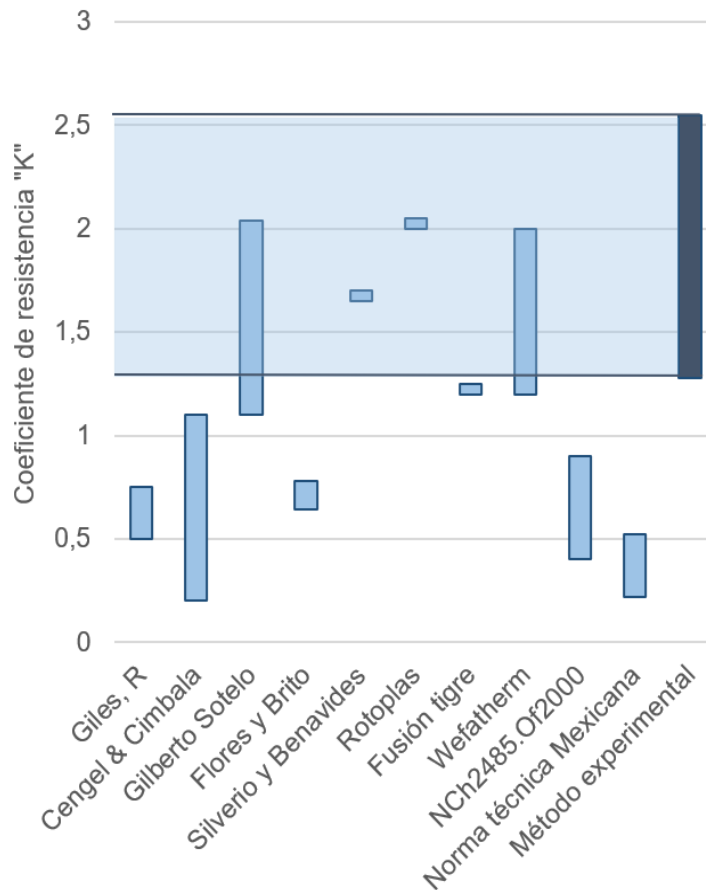


Figura 34. Comparación de valores del coeficiente de resistencia “K” para codos de 90°. Elaboración propia.

Mediante la figura 34 se aprecia que los resultados obtenidos para codos de 90° son similares a los valores registrados por Gilberto Sotelo, y con los publicados por Silverio y Benavides. Asimismo, se observa una concordancia con los catálogos de fabricantes como Rotoplas y Wefatherm. Estas coincidencias respaldan la validez de los resultados experimentales de la presente

investigación, especialmente con el catálogo de Rotoplas, fabricante del material utilizado en el sistema hidráulico de medición.

Por el contrario, se identificaron importantes discrepancias entre los valores experimentales y los estipulados en la normativa técnica mexicana y chilena. Esta situación es relevante, ya que usualmente suelen ser las principales referencias en el cálculo de las pérdidas de carga locales en sistemas hidráulicos de distribución de agua. Estos resultados evidencian una posible falta de actualización y precisión de dichas normativas, las cuales tienden a subestimar las pérdidas de cargas locales generadas en codos de 90°.

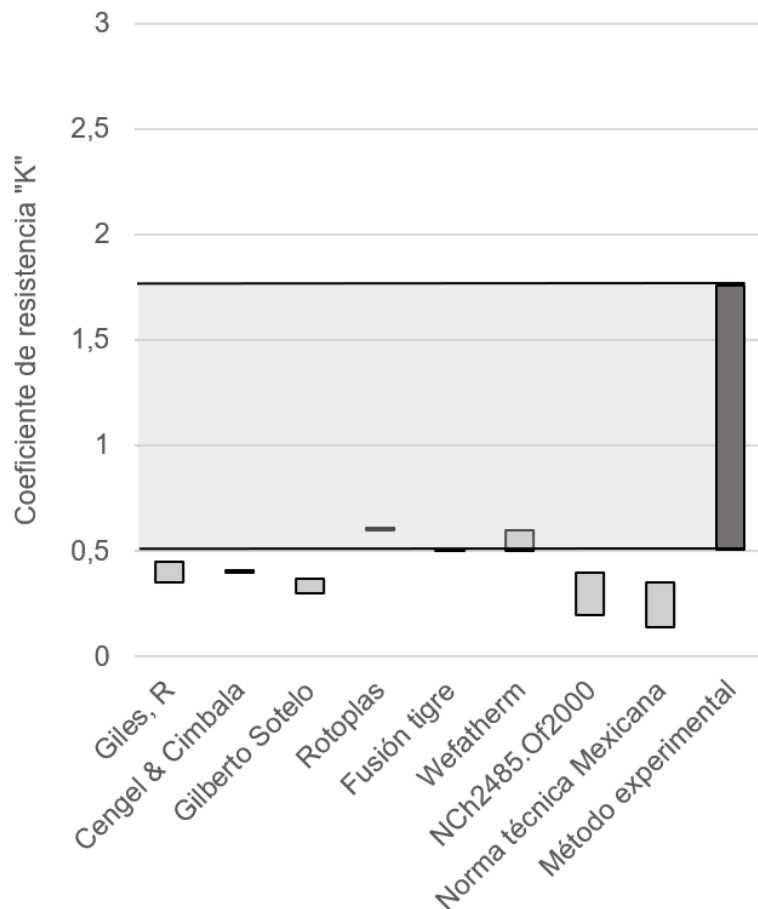


Figura 35. Comparación de valores del coeficiente de resistencia "K" para codos de 45°. Elaboración propia.

Para los codos de 45° los resultados experimentales muestran coincidencia con los valores reportados por los fabricantes Rotoplas, Fusión Tigre y Wefatherm. A

diferencias de los valores publicados por Giles, Cengel y Cimbala, y Sotelo, así como los estipulados por las normativas técnicas mexicanas y chilenas, las cuales se encuentran bajo al rango experimental obtenido. Esto quiere decir que dichas referencias se encuentran subestimando las pérdidas producidas en codos de 45°.

También se observa que los valores experimentales menores, correspondientes a mayores caudales de flujo, son los más cercanos a los valores reportados por la bibliografía. Por ello, es que se deberá tener especial atención a las pérdidas de carga generadas por bajos caudales durante el diseño de las redes hidráulicas.

4.5. Implementación: Pérdidas de cargas locales

El valor del coeficiente de resistencia “K” influye directamente en la estimación de las pérdidas de carga local, donde valores más elevados de K generan pérdidas de presión mayores. Si bien los resultados experimentales de esta investigación muestran una tendencia potencialmente decreciente de K en función del caudal de flujo, esto no implica que las pérdidas de cargas disminuyan conforme aumenta el caudal. Por el contrario, dichas pérdidas se continúan incrementando, aunque a una menor proporción.

Con el objetivo de llevar estos resultados a un contexto práctico y aplicable, se calcularon las pérdidas de carga de acuerdo con los distintos valores de K entregados por la bibliografía. Mediante este análisis se logra analizar la relevancia de los cambios de valores de K sobre las pérdidas de carga local, contribuyendo con una evaluación complementaria de su comportamiento hidráulico en condiciones reales.

A continuación, la tabla 16 muestra los valores de las pérdidas de presión en metros columna de agua para codos de 90° en función de distintas velocidades de flujo.

Tabla 16. Evaluación de pérdidas de cargas locales por diferentes métodos para codos de 90°.

Velocidad [m/s]	Q [l/min]	Pérdida de carga [mca]								Valor experimental
		Giles, R	Sotelo, G.	Cengel y Cimbala	Rotoplas	Tigre	Wefatherm	NTC México	NCh2485 .Of1999	
0.1	0.7634	0.0001	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	0.0003
0.1	1.5268	0.0003	0.0008	0.0005	0.0010	0.0006	0.0010	0.0003	0.0005	0.0012
0.2	3.0536	0.0013	0.0032	0.0018	0.0041	0.0024	0.0041	0.0011	0.0018	0.0042
0.3	4.5804	0.0029	0.0072	0.0041	0.0092	0.0055	0.0092	0.0024	0.0041	0.0088
0.4	6.1073	0.0051	0.0128	0.0073	0.0163	0.0098	0.0163	0.0042	0.0073	0.0148
0.5	7.6341	0.0080	0.0200	0.0115	0.0255	0.0153	0.0255	0.0066	0.0115	0.0222
0.6	9.1609	0.0115	0.0289	0.0165	0.0367	0.0220	0.0367	0.0095	0.0165	0.0310
0.7	10.6877	0.0156	0.0393	0.0225	0.0500	0.0300	0.0500	0.0130	0.0225	0.0410
0.8	12.2145	0.0204	0.0513	0.0294	0.0653	0.0392	0.0653	0.0170	0.0294	0.0522
0.9	13.7413	0.0258	0.0649	0.0372	0.0826	0.0496	0.0826	0.0215	0.0372	0.0646
1.0	15.2681	0.0319	0.0801	0.0459	0.1020	0.0612	0.1020	0.0265	0.0459	0.0782
1.1	16.7950	0.0386	0.0970	0.0555	0.1234	0.0740	0.1234	0.0321	0.0555	0.0930
1.2	18.3218	0.0459	0.1154	0.0661	0.1468	0.0881	0.1468	0.0382	0.0661	0.1089
1.3	19.8486	0.0539	0.1355	0.0775	0.1723	0.1034	0.1723	0.0448	0.0775	0.1259
1.4	21.3754	0.0625	0.1571	0.0899	0.1999	0.1199	0.1999	0.0520	0.0899	0.1440
1.5	22.9022	0.0717	0.1803	0.1032	0.2294	0.1377	0.2294	0.0597	0.1032	0.1632
1.6	24.4290	0.0816	0.2052	0.1175	0.2610	0.1566	0.2610	0.0679	0.1175	0.1835
1.7	25.9558	0.0921	0.2316	0.1326	0.2947	0.1768	0.2947	0.0766	0.1326	0.2048
1.8	27.4827	0.1032	0.2597	0.1487	0.3304	0.1982	0.3304	0.0859	0.1487	0.2272
1.9	29.0095	0.1150	0.2893	0.1657	0.3681	0.2209	0.3681	0.0957	0.1657	0.2506
2.0	30.5363	0.1275	0.3206	0.1835	0.4079	0.2447	0.4079	0.1061	0.1835	0.2751
2.1	32.0631	0.1405	0.3535	0.2024	0.4497	0.2698	0.4497	0.1169	0.2024	0.3005
2.2	33.5899	0.1542	0.3879	0.2221	0.4935	0.2961	0.4935	0.1283	0.2221	0.3270
2.3	35.1167	0.1686	0.4240	0.2427	0.5394	0.3237	0.5394	0.1403	0.2427	0.3545
2.4	36.6435	0.1835	0.4617	0.2643	0.5874	0.3524	0.5874	0.1527	0.2643	0.3829
2.5	38.1704	0.1992	0.5009	0.2868	0.6373	0.3824	0.6373	0.1657	0.2868	0.4123

Fuente. Elaboración propia.

Como se explicó en el apartado 4.3, se observa que las pérdidas de carga locales aumentan a medida que incrementa la velocidad, a pesar que el coeficiente de resistencia disminuye conforme crece el caudal, lo cual ocurre para todas las referencias analizadas. Para estudiar de manera más sencilla este comportamiento, a continuación, se comparan las pérdidas de carga local generadas a partir de los valores reportados por los fabricantes y las normativas vigentes en México y Chile (ver figura 36).

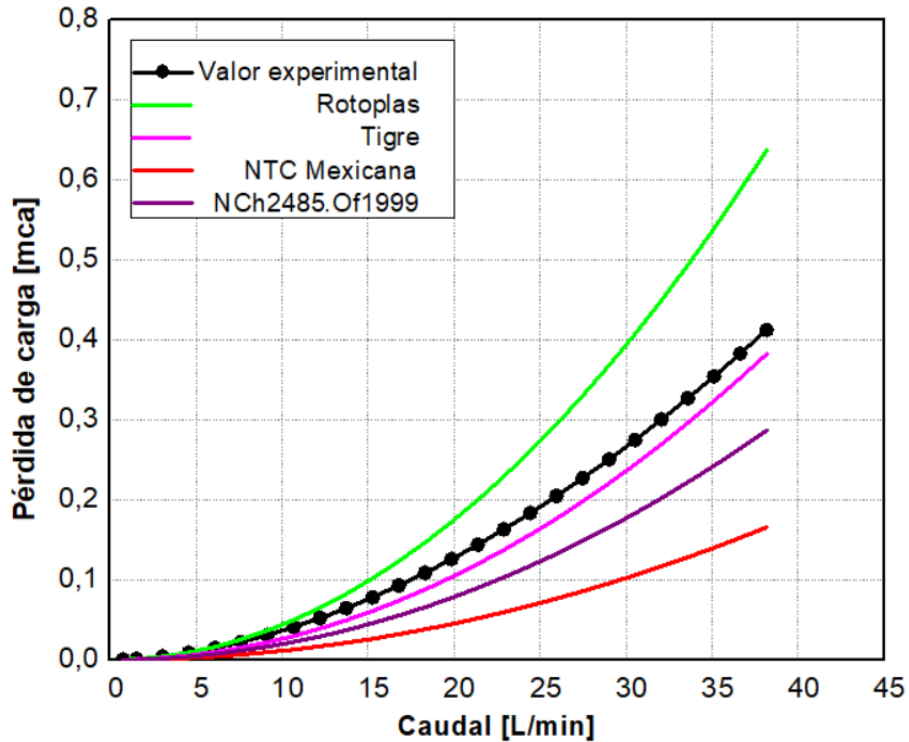


Figura 36. Comparación de las pérdidas de carga en codo de 90°. Elaboración propia.

La figura 36 evidencia el incremento de las pérdidas de carga local a medida que aumenta el caudal de flujo, lo cual es un comportamiento esperado en los sistemas que transportan agua, debido a las turbulencias y cambios en la distribución de velocidades, que genera el aumento del caudal.

Los resultados experimentales de esta investigación se encuentran en un rango intermedio. Dichos valores presentan pérdidas de carga superiores a las reportadas por la marca Tigre y a las establecidas por la normativa de chilena y mexicana. Sin embargo, resultaron ser menores a las entregadas por Rotoplas. Específicamente, los valores reportados por Rotoplas generan pérdidas mayores a partir de los 4.5 [l/min], aproximadamente, lo que puede atribuirse a la aplicación de un posible factor de seguridad, y por ende en un diseño hidráulico más conservador.

Con respecto a las normativas analizadas, se observa una mayor similitud con la normativa chilena en comparación con la mexicana. No obstante, ambas normas entregan valores de K que subestiman las pérdidas locales en los accesorios tipo codo de 90°.

En el caso de los codos de 45°, la comparación de las pérdidas locales generadas a través de los valores entregados por las diversas referencias, presenta un comportamiento análogo al obtenido en los codos de 90°, como se observa en la tabla 17.

Tabla 17. Evaluación de pérdidas de cargas locales por diferentes métodos para codos de 45°.

Velocidad [m/s]	Q [l/min]	Pérdida de carga [mca]								Valor experimental
		Giles, R	Sotelo, G.	Cengel y Cimbala	Rotoplas	Tigre	Wefatherm	NTC México	NCh248 5.Of1999	
0.1	0.763	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0002
0.1	1.527	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001	0.0002	0.0008
0.2	3.054	0.0008	0.0007	0.0008	0.0012	0.0010	0.0012	0.0005	0.0008	0.0025
0.3	4.580	0.0018	0.0015	0.0018	0.0028	0.0023	0.0028	0.0011	0.0018	0.0048
0.4	6.107	0.0033	0.0027	0.0033	0.0049	0.0041	0.0049	0.0020	0.0033	0.0078
0.5	7.634	0.0051	0.0042	0.0051	0.0076	0.0064	0.0076	0.0032	0.0051	0.0113
0.6	9.161	0.0073	0.0061	0.0073	0.0110	0.0092	0.0110	0.0046	0.0073	0.0153
0.7	10.688	0.0100	0.0082	0.0100	0.0150	0.0125	0.0150	0.0062	0.0100	0.0197
0.8	12.215	0.0131	0.0108	0.0131	0.0196	0.0163	0.0196	0.0082	0.0131	0.0246
0.9	13.741	0.0165	0.0136	0.0165	0.0248	0.0206	0.0248	0.0103	0.0165	0.0300
1.0	15.268	0.0204	0.0168	0.0204	0.0306	0.0255	0.0306	0.0127	0.0204	0.0357
1.1	16.795	0.0247	0.0204	0.0247	0.0370	0.0308	0.0370	0.0154	0.0247	0.0418
1.2	18.322	0.0294	0.0242	0.0294	0.0441	0.0367	0.0441	0.0184	0.0294	0.0483
1.3	19.849	0.0345	0.0284	0.0345	0.0517	0.0431	0.0517	0.0215	0.0345	0.0552
1.4	21.375	0.0400	0.0330	0.0400	0.0600	0.0500	0.0600	0.0250	0.0400	0.0624
1.5	22.902	0.0459	0.0379	0.0459	0.0688	0.0574	0.0688	0.0287	0.0459	0.0700
1.6	24.429	0.0522	0.0431	0.0522	0.0783	0.0653	0.0783	0.0326	0.0522	0.0779
1.7	25.956	0.0589	0.0486	0.0589	0.0884	0.0737	0.0884	0.0368	0.0589	0.0862
1.8	27.483	0.0661	0.0545	0.0661	0.0991	0.0826	0.0991	0.0413	0.0661	0.0948
1.9	29.009	0.0736	0.0607	0.0736	0.1104	0.0920	0.1104	0.0460	0.0736	0.1037
2.0	30.536	0.0816	0.0673	0.0816	0.1224	0.1020	0.1224	0.0510	0.0816	0.1129
2.1	32.063	0.0899	0.0742	0.0899	0.1349	0.1124	0.1349	0.0562	0.0899	0.1225
2.2	33.590	0.0987	0.0814	0.0987	0.1481	0.1234	0.1481	0.0617	0.0987	0.1323
2.3	35.117	0.1079	0.0890	0.1079	0.1618	0.1349	0.1618	0.0674	0.1079	0.1425
2.4	36.644	0.1175	0.0969	0.1175	0.1762	0.1468	0.1762	0.0734	0.1175	0.1529
2.5	38.170	0.1275	0.1052	0.1275	0.1912	0.1593	0.1912	0.0797	0.1275	0.1637

Fuente. Elaboración propia.

Al igual que en codos de 90°, el aumento de la velocidad del fluido provoca mayores pérdidas de carga local. Sin embargo, los codos de 45° presentan pérdidas considerablemente menores, siendo en promedio, un 53% inferiores a

las generadas en codos de 90°. Además, las diferencias entre las pérdidas generadas por ambos tipos de codos, se acentúa conforme aumenta el caudal de flujo.

A continuación, se presenta una gráfica comparativa de las pérdidas locales obtenidas con los resultados experimentales y las que fueron calculadas mediante los valores establecidos por los catálogos de los fabricantes y las normativas.

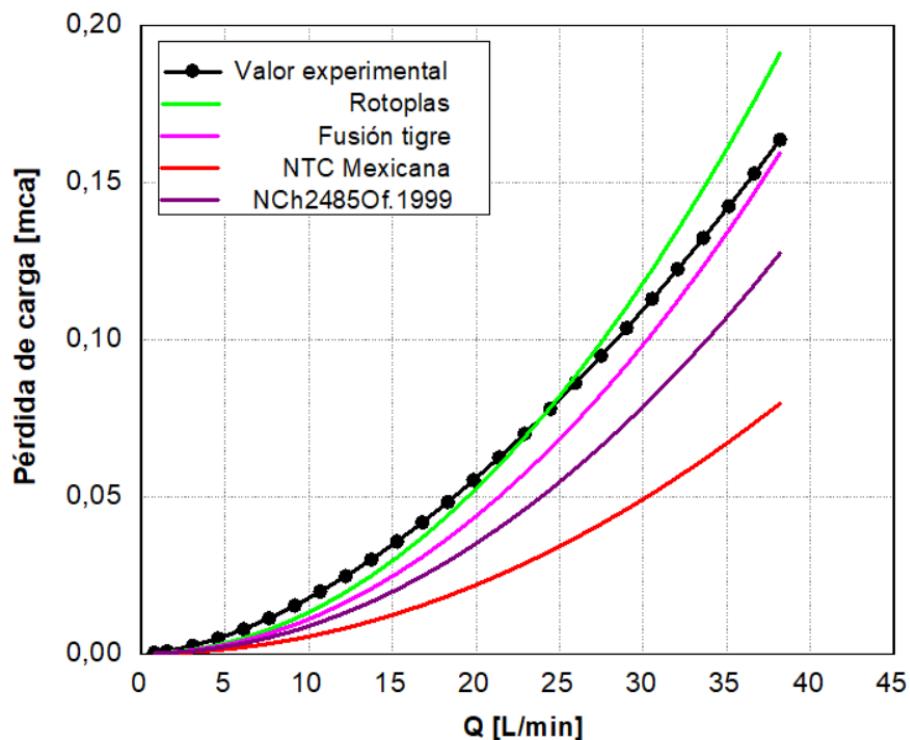


Figura 37. Comparación de las pérdidas de carga en codo de 45°. Elaboración propia.

Mediante la figura 37 se observa que para codos de 45° los caudales inferiores a 24 [l/min] presentan una mayor pérdida de carga cuando se utiliza el coeficiente obtenido de manera experimental. Sin embargo, cuando se sobrepasa dicho caudal, las pérdidas estimadas con los valores entregados por Rotoplas, superan a las experimentales.

Asimismo, se observa una gran similitud entre las pérdidas locales calculadas mediante los valores experimentales y los reportados por la empresa Tigre. Por el contrario, nuevamente se registra una pérdida de carga local menor, al utilizar los valores reportados por la normativa chilena y mexicana, subestimando las pérdidas locales en codos de 45° con diámetro nominal de 25 [mm]. Estas diferencias tienden a aumentarse conforme crece el caudal, por lo que, en la práctica, se debe prestar especial atención a las repercusiones que esto pueda ocasionar en el cálculo hidráulico de las líneas de conducción que operan con fluidos a mayores velocidades.

Mediante las gráficas presentadas en las figuras 36 y 37 se visualiza la relevancia que adquiere la elección del coeficiente de resistencia K en la estimación de las pérdidas de cargas locales y, por ende, en la eficiencia del diseño hidráulico. Una elección inadecuada del coeficiente K , puede generar diseños sobreestimados o subestimados, afectando la seguridad, desempeño y costos económicos del sistema.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El coeficiente de resistencia K es un parámetro fundamental en la estimación de las pérdidas de presión en redes de abastecimiento de agua potable. Variaciones relativamente pequeñas en su magnitud pueden generar cambios importantes en la selección de materiales, equipos y costos asociados al diseño hidráulico. En este contexto, la presente investigación proporcionó información precisa con respecto al coeficiente de resistencia en accesorios de PPR. Por lo tanto, y de acuerdo con lo planteado en la hipótesis y objetivos formulados, se establecen las siguientes conclusiones:

1. Se identificó que los valores de K reportados en libros, catálogos de fabricantes, artículos y normativas técnicas presentan variaciones significativas. Se registran valores entre 0.2 y 2 para codos de 90° , y entre 0.16 y 0.6 para codos de 45° . Estas diferencias evidencian la necesidad de obtener valores experimentales específicos para los accesorios que conforman una red domiciliaria de agua potable.
2. Mediante el planteamiento matemático desarrollado, se confirmó que las principales variables que influyen en el coeficiente de resistencia K son el coeficiente de rugosidad, diámetro de tubería y velocidades de flujo, las cuales definen el caudal y, por ende, las pérdidas de cargas menores. Durante la experimentación se realizaron dos sets de mediciones, descartando los datos obtenidos en el primer codo de 90° (codo 1) del primer set de medición, debido a una obstrucción en la unión piezométrica que impedía una medición confiable de la presión. Esta situación permitió evidenciar que la sección transversal genera importantes variaciones en el coeficiente de resistencia, destacando la relevancia de analizar otros diámetros de tuberías en estudios futuros.

3. Las pérdidas de presión local ocurren por la disipación de energía cinética asociada a la fricción y turbulencias generadas en los accesorios de cambio de dirección. En este sentido, la ecuación de pérdida de carga menor, basada en la velocidad de flujo y el coeficiente de resistencia específico según las características del accesorio en análisis, ofrece una mayor exactitud que otros métodos simplificados. Sin embargo, estos resultados se pueden mejorar considerando coeficientes de resistencia dependientes del caudal, lo cual fue demostrado experimentalmente en esta investigación.
4. Se diseñó un sistema hidráulico de medición para determinar el coeficiente de resistencia en codos de 90° y 45° de diámetro nominal 25 [mm], el cual incorporó una válvula de compuerta que permitió regular el caudal y evaluar el comportamiento del fluido, evaluando rangos entre 4 [L/min] y 29 [L/min]. De forma se logró ejecutar un sistema acorde a las necesidades de este estudio, obteniendo datos experimentales confiables que evidenciaron un incremento de las pérdidas de presión conforme aumentaba la velocidad.
5. Los valores experimentales obtenidos muestran similitudes parciales con algunas referencias consultadas, especialmente para caudales superiores a 15 [l/min]. En general, los coeficientes obtenidos se encuentran dentro de los rangos esperados, coincidiendo con los valores proporcionados en los catálogos de los fabricantes. Sin embargo, es relevante resaltar que los valores de K determinados experimentalmente son mayores que los estipulados en la normativa técnica chilena y mexicana para los mismos accesorios. Esto implica que el uso de estas normativas conduce a una subestimación de las pérdidas de carga local generadas por los accesorios en análisis, lo que deriva en cálculos hidráulicos imprecisos. Esta situación refuerza la necesidad de actualizar los estándares normativos vigentes.
6. Los resultados confirman que para ambos tipos de codos analizados, el coeficiente K presenta una tendencia potencialmente decreciente conforme

aumenta el caudal. Este comportamiento no implica una reducción de las pérdidas de carga local a altas velocidades, sino que, estas continúan aumentando, pero a una tasa de crecimiento menor.

De esta forma se logró precisar el valor del coeficiente de resistencia “K” para codos de 90° y 45° hechos de PPR, en donde se ajustaron las ecuaciones que describen la tendencia decreciente del coeficiente de resistencia en función del caudal (Q), obteniéndose las siguientes expresiones:

- **Codo 90°:** $f(Q) = 2.5476 * Q^{-0.186}$
- **Codo 45°:** $f(Q) = 1.7588 * Q^{-0.338}$

Estas ecuaciones conforman el aporte principal de la presente investigación, ya que permiten confirmar la hipótesis planteada, demostrando que las variaciones del caudal en sistemas presurizados generan modificaciones significativas en el coeficiente de resistencia K de los accesorios de cambios de dirección.

Con respecto a la contribución práctica de estos resultados, se realizó una comparación entre las pérdidas de carga obtenidas con los diferentes valores reportados en la literatura y los valores experimentales determinados. Se observaron diferencias significativas que aumentan conforme incrementa el caudal, lo que evidencia la necesidad de aplicar un mayor rigor en el cálculo de sistemas hidráulico que operen a velocidades elevadas.

Finalmente, cabe recalcar que los valores del coeficiente de resistencia reportados en este informe, favorecen el cálculo de presiones más realista y preciso de las redes domiciliarias construidas con tuberías de PPR. La exactitud de los valores presentados contribuye directamente en la estimación de las pérdidas de carga menor y optimiza el uso de los recursos hídricos.

Recomendaciones

Se recomienda considerar las ecuaciones propuestas en esta investigación para determinar los coeficientes de resistencia K en codos de 90° y 45° fabricados con

PPR con diámetro nominal de 25 [mm]. Utilizar estos valores permitirá estimaciones más precisas de las pérdidas de carga menor, mejorando la eficiencia en los diseños de redes de distribución de agua potable.

Se espera que los resultados obtenidos sirvan como referencia para futuras líneas de investigación que busquen ampliar el alcance de este estudio. Dado que esta investigación se centró exclusivamente en codos de 90° y 45° de 25 [mm] fabricados con PPR, se recomienda extender las mediciones a otros diámetros nominales, diferentes materiales de tuberías y diversos tipos de accesorios (como válvulas, reducciones, tees y uniones). Asimismo, se sugiere analizar el comportamiento del coeficiente de resistencia en presencia de flujo laminar y transitorio, además de comparar los resultados con mediciones efectuadas en accesorios instalados en condiciones reales de servicio.

El desarrollo de estas nuevas líneas de investigación permitiría generar bases de datos experimentales más completas que respalden el diseño de redes hidráulicas más precisas y confiables.

Productos derivados de la investigación

Adicionalmente, como resultado de la presente investigación se generaron los siguientes productos académicos:

- Presentación de póster científico en el 5to Encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil (ECTI-FIC), realizado en el año 2024.
- Participación en el concurso “Presenta tu tesis en 6 minutos”, en el marco del 6to ECTI-FIC, realizado en el año 2025, en el cual se obtuvo el primer lugar en la categoría maestría.
- Presentación en modalidad póster en el 2do Congreso de la Juventud Científica de Guanajuato, organizado por el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), llevado a cabo en León de los Almada, Guanajuato, México, en el año 2025.

- Ponencia presentada en el Ciclo de Seminarios de Investigación agosto-diciembre 2025, organizado por la Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Aportación académica mediante la incorporación del sistema hidráulico de medición diseñado y construido en esta investigación al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con fines académicos.

Referencias bibliográficas consultadas

- [1] X. Fan, X. Zhang, y X. B. Yu, “Machine learning model and strategy for fast and accurate detection of leaks in water supply network”, *J. Infrastruct. Preserv. Resil.*, vol. 2, n° 1, p. 10, dic. 2021, doi: 10.1186/s43065-021-00021-6.
- [2] R. L. Mott y J. A. Untener, *Mécanica de fluidos*, Séptima edición. Ciudad de México, México: Pearson, 2015.
- [3] K. Ligaj, M. K. Widomski, y A. Musz-Pomorska, “Minor pressure losses for different connections of PP-R and PEX/Al/PEX installation pipes”, *E3S Web Conf.*, vol. 100, p. 00045, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201910000045.
- [4] Y. A. Cengel, *Mecanica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. Mexico: McGraw-Hill, 2006.
- [5] J. Saldarriaga, *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá, Colombia: Alfaomega, 2009.
- [6] C. Z. Zhao, M. C. Huang, Y. Liu, y L. P. Ma, “Research on Life Cycle Assessment of Plastic Pipeline System”, *Mater. Sci. Forum*, vol. 847, pp. 366–373, mar. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.366.
- [7] P. A. Toribio Pando, P. S. Cruz Roldán, y A. Landauro Abanto, “Ventajas fundamentadas y consideraciones del sistema de tuberías de polipropileno beta nucleado frente al acero inoxidable”, *Ind. Data*, vol. 24, n° 2, pp. 7–27, dic. 2021, doi: 10.15381/idata.v24i2.18756.
- [8] R. Sadiq, B. Rajani, y Y. Kleiner, “Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 86, n° 1, pp. 1–10, oct. 2004, doi: 10.1016/j.ress.2003.12.007.
- [9] G. Sotelo Ávila, *Hidráulica general*, 1a ed. México: Limusa, 2011.
- [10] C. Flores y H. Brito, “Design of a piping system to measure constant accessories”, ESPOCH (ICPE-2017), Riobamba, Ecuador, 2018, doi: 10.1063/1.5050357.
- [11] N. Silverio y H. Benavides Muñoz, “Determinación de pérdidas de carga en accesorios ‘k’ de Sistemas Domiciliarios”, *Ecuadorian Sci. J.*, vol. 4, n° 2, pp. 7–11, sep. 2020, doi: 10.46480/esj.4.2.58.
- [12] R. Mańko y N. Laskowski, “Values of the head loss coefficients of elbows in the press system”, *Instal*, vol. 446, n° 12, pp. 22–25, dic. 2022, doi: 10.36119/15.2022.12.4.
- [13] Catálogo técnico. PPR Termofusión. Tigre. Lurín, LI.
- [14] Catálogo técnico. Sistema PP-R y PP-RCT. Polysan / Wefatherm. Moscardó, Mad.
- [15] Instituto Nacional de Normalización. Instalaciones domiciliarias de agua potable – Diseño, cálculo y requisitos de las redes interiores. Santiago, Chile, 2020.

- [16] Gobierno del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas. Ciudad de México, México, 2004.
- [17] Secretaría de educación pública. Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones. Ciudad de México, México, 2022.
- [18] T. Uehara y A. Traini Ferreira, “Decaimiento de temperatura em tubos de ppr embutidos em alvenaria de tijolos cerâmicos”, en XV simpósio nacional de sistemas prediais, oct. 2023, pp. 136–143. doi: 10.46421/sispred.v3.2975.
- [19] H. Zhang, Y. Yang, X. Li, Y. Liu, y L. Zhao, “Evaluation of biofilm development on various pipelines in the domestic hot water system”, *Water Supply*, vol. 18, n° 2, pp. 638–647, abr. 2018, doi: 10.2166/ws.2017.138.
- [20] N. Ogura, Y. Konishi, S. Artur, y T. Shiotani, “Monitoring of repaired water leaks using surface wave tomography”, *Dev. Built Environ.*, vol. 14, p. 100133, abr. 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2023.100133.
- [21] E. Dardati, *La gestión hídrica en Australia e Israel: Dos modelos, un solo fin*. Buenos Aires, Argentina, 2021.
- [22] B. A. Beker y M. L. Kansal, “Complexities of the urban drinking water systems in Ethiopia and possible interventions for sustainability”, *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 26, n° 2, pp. 4629–4659, ene. 2023, doi: 10.1007/s10668-022-02901-7.
- [23] A. Sadeghioon, N. Metje, D. Chapman, y C. Anthony, “SmartPipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines”, *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 3, n° 1, pp. 64–78, feb. 2014, doi: 10.3390/jsan3010064.
- [24] H. F. Duan, “Development of a TFR-Based Method for the Simultaneous Detection of Leakage and Partial Blockage in Water Supply Pipelines”, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 146, n° 7, p. 04020051, jul. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001764.
- [25] Wichowski, Siwec, y Kalenik, “Effect of the Concentration of Sand in a Mixture of Water and Sand Flowing through PP and PVC Elbows on the Minor Head Loss Coefficient”, *Water*, vol. 11, n° 4, p. 828, abr. 2019, doi: 10.3390/w11040828.
- [26] N. Krešić, *Groundwater resources: sustainability, management, and restoration*. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [27] UNESCO, *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos 2021: Datos y cifras*. Paris, Francia, 2021.
- [28] UNESCO, *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos 2022: Aguas Subterráneas: Hacer Visible El Recurso Invisible*. Paris, Francia, 2022.
- [29] T. Al Qahtani, M. Yaakob, N. Yidris, S. Sulaiman y K. Ahmad, “A review on water leakage detection method in the water distribution network”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol 68, n°2, 2020.

[30] N. Chuquín, J. Chuquín y D. Chuquín, *Hidráulica en Tuberías y Accesorios (Válvulas Industriales): Pérdidas, Casos reales de Aplicación y Selección de Bombas Centrifugas*, Primera edición, CIDE, 2020.

[31] Universidad Agraria del Ecuador y F. Gavilánez-Luna, “Incidencia de la presión sobre el coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams”, *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 10, n° 5, pp. 214–225, sep. 2019, doi: 10.24850/j-tyca-2019-05-08.

[32] J. P. Ynchicsana Bellido, P. E. Suarez Cabellos, G. A. Santa Cruz Curo, J. L. Choquehuanca Campos, y R. M. Neira Contreras, *Trazado y diseño de tuberías de polipropileno en lugar de tuberías de PVC*, tesis de bachiller, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, ago. 2020.

Anexos

Anexo A: Primera tanda de medición ramal 3

Medición	T°	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Caudal [L/min]	N° de Reynolds	Flujo	Codo 1 (90°)		Codo 2 (45°)		Codo 3 (45°)		Codo 4 (90°)	
						Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K
1	26.5	0.0000085970	10.19	13977.06	Turbulento	0.02	0.880	0.025	1.100	0.015	0.660	0.045	1.981
2	26.6	0.0000085808	11.57	15890.06	Turbulento	0.025	0.855	0.025	0.855	0.017	0.581	0.05	1.709
3	26.6	0.0000085808	13.49	18538.67	Turbulento	0.037	0.929	0.035	0.879	0.04	1.004	0.06	1.507
4	26.8	0.0000085484	13.54	18668.28	Turbulento	0.045	1.123	0.038	0.948	0.035	0.873	0.069	1.722
5	26.9	0.0000085322	14.05	19416.60	Turbulento	0.04	0.926	0.038	0.880	0.035	0.810	0.057	1.320
6	26.9	0.0000085322	16.20	22389.15	Turbulento	0.05	0.871	0.047	0.818	0.033	0.575	0.0845	1.471
7	27.0	0.0000085160	16.78	23229.46	Turbulento	0.05	0.812	0.042	0.682	0.03	0.487	0.08	1.299
8	27.0	0.0000085160	16.89	23386.58	Turbulento	0.053	0.849	0.05	0.801	0.045	0.721	0.076	1.218
9	27.1	0.0000084998	16.99	23568.96	Turbulento	0.052	0.823	0.045	0.713	0.04	0.633	0.085	1.346
10	31.8	0.0000077384	11.22	17093.39	Turbulento	0.03	1.090	0.022	0.799	0.028	1.017	0.045	1.634
11	32.1	0.0000076898	12.57	19275.87	Turbulento	0.025	0.723	0.025	0.723	0.027	0.781	0.048	1.388
12	32.4	0.0000076412	12.59	19420.74	Turbulento	0.025	0.721	0.035	1.010	0.028	0.808	0.059	1.703
13	31.4	0.0000078032	12.70	19185.87	Turbulento	0.03	0.851	0.027	0.766	0.025	0.709	0.045	1.276
14	31.2	0.0000078356	15.14	22786.49	Turbulento	0.045	0.897	0.045	0.897	0.046	0.917	0.067	1.336
15	30.8	0.0000079004	16.42	24505.51	Turbulento	0.044	0.746	0.045	0.763	0.047	0.797	0.08	1.356
16	30.9	0.0000078842	17.51	26186.71	Turbulento	0.048	0.716	0.055	0.820	0.042	0.626	0.093	1.386
17	33.0	0.0000075440	11.22	17526.41	Turbulento	0.02	0.727	0.025	0.909	0.025	0.909	0.04	1.454
18	33.1	0.0000075278	12.23	19154.77	Turbulento	0.025	0.764	0.031	0.947	0.028	0.856	0.049	1.498
19	33.3	0.0000074954	12.94	20350.11	Turbulento	0.025	0.683	0.035	0.956	0.03	0.819	0.058	1.584
20	33.4	0.0000074792	14.35	22620.28	Turbulento	0.034	0.755	0.027	0.599	0.022	0.488	0.069	1.532
21	33.6	0.0000074468	15.46	24479.67	Turbulento	0.042	0.803	0.036	0.688	0.04	0.765	0.073	1.396
22	33.9	0.0000073982	16.30	25969.27	Turbulento	0.04	0.689	0.043	0.740	0.043	0.740	0.068	1.171
23	33.6	0.0000074468	17.05	26994.55	Turbulento	0.047	0.739	0.05	0.786	0.04	0.629	0.08	1.258
24	33.8	0.0000074144	14.45	22969.09	Turbulento	0.035	0.767	0.041	0.898	0.04	0.876	0.069	1.512
25	32.6	0.0000076088	15.11	23410.83	Turbulento	0.042	0.841	0.04	0.801	0.042	0.841	0.07	1.402
26	33.3	0.0000074954	16.36	25724.34	Turbulento	0.043	0.735	0.042	0.718	0.041	0.701	0.07	1.197
27	32.6	0.0000076088	16.63	25760.26	Turbulento	0.046	0.761	0.042	0.695	0.037	0.612	0.078	1.290
28	33.1	0.0000075278	16.84	26372.12	Turbulento	0.051	0.822	0.052	0.838	0.042	0.677	0.092	1.483
29	33.5	0.0000074630	17.06	26949.19	Turbulento	0.046	0.723	0.052	0.817	0.04	0.628	0.09	1.414
30	32.8	0.0000075764	17.76	27642.37	Turbulento	0.055	0.797	0.048	0.695	0.042	0.609	0.098	1.420
31	33.6	0.0000074468	21.03	33298.78	Turbulento	0.035	0.767	0.041	0.898	0.04	0.876	0.069	1.512
32	33.6	0.0000074468	14.55	23028.91	Turbulento	0.038	0.821	0.025	0.540	0.027	0.583	0.065	1.405
33	33.0	0.0000075440	14.61	22833.29	Turbulento	0.036	0.771	0.024	0.514	0.026	0.557	0.065	1.392
34	32.9	0.0000075602	15.44	24077.83	Turbulento	0.04	0.767	0.039	0.748	0.032	0.614	0.07	1.342
35	33.3	0.0000074954	16.03	25211.99	Turbulento	0.047	0.836	0.044	0.783	0.024	0.427	0.075	1.335
36	33.1	0.0000075278	17.10	26785.69	Turbulento	0.045	0.703	0.043	0.672	0.037	0.578	0.087	1.360
37	32.7	0.0000075926	18.02	27977.32	Turbulento	0.055	0.775	0.05	0.704	0.042	0.591	0.09	1.267
38	33.7	0.0000074306	13.08	20758.06	Turbulento	0.032	0.855	0.026	0.694	0.022	0.588	0.054	1.442
39	33.8	0.0000074144	15.47	24594.93	Turbulento	0.043	0.822	0.038	0.726	0.033	0.631	0.071	1.357
40	34.2	0.0000073496	15.56	24959.26	Turbulento	0.042	0.793	0.037	0.699	0.034	0.642	0.076	1.435
41	33.9	0.0000073982	16.40	26127.86	Turbulento	0.043	0.731	0.041	0.697	0.034	0.578	0.075	1.276
42	34.1	0.0000073658	16.80	26896.87	Turbulento	0.049	0.793	0.045	0.729	0.035	0.567	0.093	1.506
43	34.3	0.0000073334	17.32	27837.08	Turbulento	0.05	0.762	0.046	0.701	0.038	0.579	0.095	1.449
44	34.0	0.0000073820	17.83	28480.12	Turbulento	0.052	0.748	0.045	0.647	0.041	0.589	0.098	1.409
45	34.4	0.0000073172	18.00	29000.14	Turbulento	0.049	0.692	0.052	0.734	0.041	0.579	0.097	1.369
46	34.4	0.0000073172	19.28	31061.85	Turbulento	0.049	0.692	0.052	0.734	0.041	0.579	0.097	1.369
47	32.7	0.0000075926	21.61	33551.45	Turbulento	0.078	0.764	0.074	0.725	0.073	0.715	0.138	1.351
48	32.7	0.0000075926	22.27	34583.75	Turbulento	0.083	0.765	0.079	0.728	0.068	0.627	0.157	1.447
49	34.1	0.0000073658	16.85	26973.21	Turbulento	0.048	0.773	0.041	0.660	0.033	0.531	0.095	1.529
50	33.9	0.0000073982	17.94	28584.88	Turbulento	0.05	0.710	0.049	0.696	0.047	0.668	0.106	1.506
51	33.8	0.0000074144	19.28	30652.54	Turbulento	0.061	0.750	0.051	0.627	0.04	0.492	0.117	1.439
52	34.3	0.0000073334	19.38	31157.51	Turbulento	0.068	0.828	0.053	0.645	0.033	0.402	0.11	1.339
53	32.5	0.0000076250	19.59	30296.39	Turbulento	0.071	0.845	0.061	0.726	0.055	0.655	0.12	1.429
54	33.1	0.0000075278	20.29	31782.13	Turbulento	0.068	0.755	0.065	0.722	0.053	0.588	0.136	1.510
55	34.9	0.0000072362	20.51	33414.06	Turbulento	0.077	0.837	0.06	0.652	0.042	0.457	0.135	1.467
56	32.4	0.0000076412	20.61	31800.33	Turbulento	0.073	0.786	0.067	0.721	0.055	0.592	0.134	1.442
57	33.5	0.0000074630	20.79	32849.21	Turbulento	0.068	0.719	0.064	0.677	0.052	0.550	0.136	1.438
58	34.3	0.0000073334	20.81	33454.22	Turbulento	0.067	0.707	0.059	0.623	0.046	0.486	0.14	1.478
59	32.2	0.0000076736	20.81	31978.87	Turbulento	0.077	0.813	0.068	0.718	0.063	0.665	0.141	1.488
60	34.8	0.0000072524	20.93	34029.39	Turbulento	0.068	0.709	0.059	0.616	0.047	0.490	0.13	1.356

Medición	T°	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Caudal [L/min]	N° de Reynolds	Flujo	Codo 1 (90°)		Codo 2 (45°)		Codo 3 (45°)		Codo 4 (90°)	
						Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K
61	32.0	0.0000077060	21.13	32328.62	Turbulento	0.079	0.809	0.072	0.737	0.066	0.676	0.149	1.526
62	32.8	0.0000075764	21.15	32905.89	Turbulento	0.081	0.828	0.073	0.746	0.068	0.695	0.148	1.513
63	33.5	0.0000074630	21.15	33417.94	Turbulento	0.067	0.685	0.048	0.490	0.047	0.480	0.134	1.369
64	32.9	0.0000075602	21.60	33682.92	Turbulento	0.078	0.764	0.07	0.686	0.08	0.784	0.142	1.392
65	34.7	0.0000072686	21.60	35041.44	Turbulento	0.073	0.715	0.069	0.676	0.058	0.568	0.147	1.440
66	33.3	0.0000074954	21.89	34432.38	Turbulento	0.079	0.754	0.062	0.592	0.057	0.544	0.156	1.488
67	31.9	0.0000077222	22.35	34123.44	Turbulento	0.085	0.778	0.085	0.778	0.074	0.677	0.157	1.437
68	34.6	0.0000072848	22.43	36293.37	Turbulento	0.083	0.755	0.081	0.736	0.07	0.636	0.157	1.427
69	35.1	0.0000072068	22.45	36718.81	Turbulento	0.095	0.862	0.075	0.681	0.067	0.608	0.159	1.443
70	34.5	0.0000073010	22.59	36479.45	Turbulento	0.078	0.699	0.072	0.645	0.059	0.529	0.151	1.353
71	33.1	0.0000075278	23.07	36122.10	Turbulento	0.084	0.722	0.077	0.662	0.064	0.550	0.153	1.315
72	32.7	0.0000075926	23.51	36500.41	Turbulento	0.087	0.720	0.076	0.629	0.073	0.604	0.163	1.349
73	33.9	0.0000073982	12.37	19704.94	Turbulento	0.024	0.718	0.028	0.837	0.023	0.688	0.059	1.764
74	33.6	0.0000074468	13.40	21217.32	Turbulento	0.035	0.891	0.031	0.789	0.028	0.713	0.068	1.731
75	34.1	0.0000073658	14.29	22872.80	Turbulento	0.029	0.649	0.03	0.672	0.03	0.672	0.064	1.433
76	33.5	0.0000074630	15.08	23817.70	Turbulento	0.044	0.885	0.037	0.744	0.034	0.684	0.084	1.689
77	32.9	0.0000075602	15.12	23574.95	Turbulento	0.044	0.880	0.038	0.760	0.035	0.700	0.08	1.600
78	34.3	0.0000073334	15.41	24779.94	Turbulento	0.043	0.827	0.037	0.712	0.033	0.635	0.084	1.616
79	34.6	0.0000072848	16.14	26125.17	Turbulento	0.04	0.702	0.032	0.561	0.036	0.632	0.084	1.474
80	34.5	0.0000073010	16.87	27234.74	Turbulento	0.052	0.836	0.049	0.788	0.038	0.611	0.097	1.559
81	33.2	0.0000075116	17.03	26734.86	Turbulento	0.05	0.788	0.044	0.693	0.041	0.646	0.094	1.481
82	32.7	0.0000075926	17.86	27731.12	Turbulento	0.053	0.760	0.054	0.774	0.047	0.674	0.105	1.505
83	32.5	0.0000076250	18.80	29074.29	Turbulento	0.06	0.776	0.057	0.737	0.052	0.672	0.118	1.526
84	34.4	0.0000073172	19.39	31241.67	Turbulento	0.057	0.693	0.05	0.608	0.045	0.547	0.116	1.411
85	32.3	0.0000076574	19.55	30097.62	Turbulento	0.064	0.766	0.058	0.694	0.05	0.598	0.131	1.567
86	32.2	0.0000076736	20.96	32199.77	Turbulento	0.068	0.708	0.064	0.666	0.053	0.552	0.108	1.124
87	32.0	0.0000077060	22.70	34725.51	Turbulento	0.085	0.754	0.075	0.666	0.063	0.559	0.165	1.464
88	32.9	0.0000075602	9.02	14062.86	Turbulento	0.012	0.675	0.019	1.068	0.019	1.068	0.032	1.799
89	33.8	0.0000074144	10.47	16646.47	Turbulento	0.018	0.751	0.02	0.834	0.019	0.793	0.035	1.460
90	33.2	0.0000075116	10.57	16582.42	Turbulento	0.012	0.491	0.021	0.860	0.021	0.860	0.039	1.597
91	33.4	0.0000074792	13.00	20498.94	Turbulento	0.032	0.865	0.035	0.946	0.028	0.757	0.06	1.622
92	33.6	0.0000074468	14.43	22849.27	Turbulento	0.032	0.702	0.03	0.658	0.028	0.615	0.065	1.427
93	32.6	0.0000076088	19.67	30480.84	Turbulento	0.058	0.685	0.056	0.662	0.05	0.591	0.128	1.512
94	32.5	0.0000076250	20.54	31762.90	Turbulento	0.071	0.769	0.06	0.650	0.056	0.607	0.127	1.376
95	32.4	0.0000076412	21.57	33275.47	Turbulento	0.069	0.678	0.062	0.609	0.063	0.619	0.143	1.406
96	32.3	0.0000076574	22.44	34541.45	Turbulento	0.078	0.709	0.07	0.636	0.068	0.618	0.15	1.363
97	32.1	0.0000076898	22.82	34981.24	Turbulento	0.085	0.746	0.073	0.641	0.065	0.571	0.169	1.484

Anexo B: Segunda tanda de medición ramal 3

Medición	T°	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Caudal [L/min]	N° de Reynolds	Flujo	Codo 1 (90°)		Codo 2 (45°)		Codo 3 (45°)		Codo 4 (90°)	
						Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K
98	31.6	0.00000077708	11.77	17853.94	Turbulento	0.048	1.585	0.024	0.792	0.022	0.726	0.046	1.519
99	31.8	0.00000077384	17.11	26059.43	Turbulento	0.1	1.563	0.043	0.672	0.037	0.578	0.098	1.531
100	31.4	0.00000078032	18.96	28650.82	Turbulento	0.125	1.589	0.058	0.737	0.059	0.750	0.11	1.399
101	32.1	0.00000076898	20.36	31208.58	Turbulento	0.148	1.633	0.057	0.629	0.055	0.607	0.136	1.501
102	31.9	0.00000077222	21.70	33133.36	Turbulento	0.161	1.563	0.065	0.631	0.069	0.670	0.14	1.359
103	31.4	0.00000078032	22.26	33632.66	Turbulento	0.166	1.532	0.066	0.609	0.064	0.590	0.157	1.449
104	33.2	0.00000075116	6.06	9518.50	Turbulento	0.016	1.989	0.008	0.994	0.008	0.994	0.017	2.113
105	33.3	0.00000074954	7.27	11433.65	Turbulento	0.021	1.817	0.01	0.865	0.009	0.779	0.02	1.730
106	33.0	0.00000075440	8.48	13254.22	Turbulento	0.026	1.653	0.011	0.699	0.012	0.763	0.027	1.716
107	31.2	0.00000078356	9.17	13789.81	Turbulento	0.033	1.796	0.017	0.925	0.018	0.980	0.032	1.742
108	31.5	0.00000077870	12.49	18915.55	Turbulento	0.058	1.699	0.026	0.762	0.027	0.791	0.057	1.670
109	32.6	0.00000076088	13.10	20295.45	Turbulento	0.057	1.519	0.024	0.640	0.024	0.640	0.054	1.439
110	31.6	0.00000077708	16.05	24355.99	Turbulento	0.094	1.668	0.035	0.621	0.036	0.639	0.096	1.703
111	32.8	0.00000075764	16.08	25027.23	Turbulento	0.094	1.661	0.034	0.601	0.036	0.636	0.095	1.679
112	32.6	0.00000076088	18.75	29052.93	Turbulento	0.112	1.456	0.047	0.611	0.052	0.676	0.116	1.508
113	31.8	0.00000077384	19.29	29392.47	Turbulento	0.127	1.560	0.048	0.590	0.049	0.602	0.115	1.413
114	32.5	0.00000076250	19.37	29953.31	Turbulento	0.134	1.632	0.048	0.585	0.055	0.670	0.115	1.401
115	31.9	0.00000077222	19.77	30186.22	Turbulento	0.118	1.380	0.055	0.643	0.054	0.632	0.115	1.345
116	32.3	0.00000076574	20.64	31771.71	Turbulento	0.15	1.610	0.057	0.612	0.056	0.601	0.138	1.482
117	32.0	0.00000077060	21.97	33607.21	Turbulento	0.165	1.563	0.067	0.635	0.065	0.616	0.149	1.412
118	32.2	0.00000076736	22.29	34245.24	Turbulento	0.168	1.546	0.066	0.607	0.067	0.617	0.146	1.344
119	32.1	0.00000076898	22.65	34725.47	Turbulento	0.174	1.551	0.071	0.633	0.063	0.561	0.163	1.453
120	31.3	0.00000078194	8.63	13011.37	Turbulento	0.027	1.658	0.012	0.737	0.018	1.105	0.026	1.596
121	30.9	0.00000078842	16.89	25258.10	Turbulento	0.096	1.538	0.042	0.673	0.05	0.801	0.098	1.570
122	30.7	0.00000079166	18.68	27816.61	Turbulento	0.12	1.573	0.035	0.459	0.036	0.472	0.119	1.559
123	30.6	0.00000079328	19.85	29501.53	Turbulento	0.147	1.706	0.053	0.615	0.048	0.557	0.125	1.450
124	30.5	0.00000079490	21.15	31367.53	Turbulento	0.138	1.411	0.058	0.593	0.061	0.624	0.134	1.370
125	30.3	0.00000079814	21.24	31371.10	Turbulento	0.162	1.642	0.065	0.659	0.062	0.628	0.15	1.520
126	29.3	0.00000081434	5.59	8094.93	Turbulento	0.015	2.194	0.007	1.024	0.008	1.170	0.015	2.194
127	29.5	0.00000081110	7.04	10230.67	Turbulento	0.022	2.030	0.01	0.923	0.009	0.831	0.021	1.938
128	29.6	0.00000080948	10.43	15182.97	Turbulento	0.041	1.725	0.02	0.841	0.014	0.589	0.037	1.557
129	29.7	0.00000080786	13.49	19679.44	Turbulento	0.068	1.710	0.027	0.679	0.027	0.679	0.062	1.559
130	29.8	0.00000080624	17.51	25598.36	Turbulento	0.11	1.641	0.04	0.597	0.04	0.597	0.105	1.567
131	30.0	0.00000080300	19.63	28814.08	Turbulento	0.122	1.448	0.05	0.594	0.047	0.558	0.115	1.365
132	30.1	0.00000080138	20.83	30641.64	Turbulento	0.151	1.591	0.054	0.569	0.05	0.527	0.137	1.444
133	30.9	0.00000078842	4.54	6781.79	Turbulento	0.009	2.000	0.006	1.334	0.006	1.334	0.01	2.223
134	31.8	0.00000077384	5.84	8900.00	Turbulento	0.014	1.876	0.008	1.072	0.007	0.938	0.015	2.010
135	31.6	0.00000077708	7.35	11147.42	Turbulento	0.02	1.694	0.007	0.593	0.008	0.677	0.022	1.863
136	31.4	0.00000078032	8.77	13250.68	Turbulento	0.03	1.783	0.01	0.594	0.011	0.654	0.029	1.724
137	31.2	0.00000078356	9.88	14859.43	Turbulento	0.034	1.594	0.013	0.609	0.014	0.656	0.032	1.500
138	30.9	0.00000078842	12.43	18590.60	Turbulento	0.055	1.627	0.023	0.680	0.027	0.799	0.053	1.568
139	30.5	0.00000079490	14.87	22061.19	Turbulento	0.076	1.570	0.028	0.579	0.03	0.620	0.073	1.508
140	30.1	0.00000080138	18.76	27594.38	Turbulento	0.123	1.598	0.046	0.598	0.054	0.702	0.116	1.507
141	30.0	0.00000080300	19.55	28700.54	Turbulento	0.132	1.579	0.053	0.634	0.051	0.610	0.122	1.460
142	29.8	0.00000080624	20.35	29762.21	Turbulento	0.148	1.633	0.057	0.629	0.051	0.563	0.142	1.567
143	29.5	0.00000081110	21.61	31403.06	Turbulento	0.161	1.577	0.061	0.597	0.056	0.549	0.153	1.499
144	29.3	0.00000081434	22.32	32316.14	Turbulento	0.171	1.569	0.072	0.661	0.069	0.633	0.164	1.505
145	32.5	0.00000076250	4.85	7501.81	Turbulento	0.01	1.942	0.005	0.971	0.005	0.971	0.01	1.942
146	32.1	0.00000076898	5.67	8693.83	Turbulento	0.013	1.848	0.005	0.711	0.006	0.853	0.014	1.991
147	32.7	0.00000075926	6.21	9648.15	Turbulento	0.015	1.776	0.008	0.947	0.01	1.184	0.016	1.895
148	31.7	0.00000077546	7.94	12073.53	Turbulento	0.023	1.667	0.011	0.797	0.012	0.870	0.022	1.595
149	31.4	0.00000078032	10.17	15372.53	Turbulento	0.039	1.722	0.018	0.795	0.019	0.839	0.035	1.546
150	32.9	0.00000075602	12.71	19818.96	Turbulento	0.056	1.585	0.026	0.736	0.029	0.821	0.054	1.528
151	31.1	0.00000078518	12.90	19366.09	Turbulento	0.052	1.429	0.033	0.907	0.036	0.989	0.055	1.512
152	32.8	0.00000075764	15.24	23717.12	Turbulento	0.076	1.496	0.032	0.630	0.028	0.551	0.072	1.417
153	33.0	0.00000075440	22.16	34627.03	Turbulento	0.168	1.564	0.062	0.577	0.065	0.605	0.145	1.350

Medición	T°	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Caudal [L/min]	N° de Reynolds	Flujo	Codo 1 (90°)		Codo 2 (45°)		Codo 3 (45°)		Codo 4 (90°)	
						Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K	Diferencia [m]	K
154	31.2	0.0000078356	13.57	20412.31	Turbulento	0.063	1.565	0.024	0.596	0.021	0.522	0.068	1.689
155	31.3	0.0000078194	21.94	33077.60	Turbulento	0.163	1.548	0.063	0.598	0.062	0.589	0.148	1.406
156	31.5	0.0000077870	20.66	31272.97	Turbulento	0.146	1.564	0.057	0.611	0.073	0.782	0.138	1.479
157	31.6	0.0000077708	16.98	25763.13	Turbulento	0.112	1.776	0.056	0.888	0.058	0.920	0.11	1.744
158	31.8	0.0000077384	17.96	27367.77	Turbulento	0.124	1.757	0.054	0.765	0.036	0.510	0.114	1.615
159	31.9	0.0000077222	19.02	29031.59	Turbulento	0.116	1.467	0.048	0.607	0.052	0.657	0.118	1.492
160	32.1	0.0000076898	16.49	25288.39	Turbulento	0.088	1.479	0.036	0.605	0.056	0.941	0.088	1.479
161	32.3	0.0000076574	14.62	22506.11	Turbulento	0.07	1.498	0.032	0.685	0.048	1.027	0.068	1.455
162	32.5	0.0000076250	13.36	20648.91	Turbulento	0.06	1.538	0.026	0.666	0.042	1.077	0.064	1.641
163	32.7	0.0000075926	10.60	16451.52	Turbulento	0.04	1.629	0.016	0.652	0.029	1.181	0.036	1.466
164	32.9	0.0000075602	27.36	42658.03	Turbulento							0.24	1.466
165	32.9	0.0000075602	28.26	44062.82	Turbulento							0.243	1.392
166	31.2	0.0000078356	21.88	32926.82	Turbulento	0.17	1.623	0.066	0.630	0.069	0.659	0.161	1.537
167	31.3	0.0000078194	21.39	32248.35	Turbulento	0.169	1.689	0.065	0.650	0.07	0.700	0.156	1.559
168	31.5	0.0000077870	20.22	30615.88	Turbulento	0.151	1.688	0.05	0.559	0.041	0.458	0.136	1.521
169	31.6	0.0000077708	19.86	30130.75	Turbulento	0.125	1.449	0.055	0.638	0.065	0.753	0.132	1.530
170	31.8	0.0000077384	19.01	28968.29	Turbulento	0.12	1.518	0.048	0.607	0.07	0.885	0.115	1.454
171	32.0	0.0000077060	16.64	25462.57	Turbulento	0.095	1.568	0.035	0.578	0.056	0.924	0.088	1.452
172	32.1	0.0000076898	14.83	22731.09	Turbulento	0.079	1.643	0.032	0.666	0.046	0.957	0.078	1.622
173	32.3	0.0000076574	12.34	19002.70	Turbulento	0.054	1.621	0.026	0.780	0.038	1.140	0.052	1.561
174	32.5	0.0000076250	10.54	16294.84	Turbulento	0.039	1.605	0.018	0.741	0.03	1.235	0.036	1.482
175	32.8	0.0000075764	8.07	12558.57	Turbulento	0.024	1.685	0.01	0.702	0.011	0.772	0.022	1.544
176	33.0	0.0000075440	5.76	8999.75	Turbulento	0.013	1.792	0.006	0.827	0.008	1.103	0.012	1.654
177	33.2	0.0000075116	4.29	6737.51	Turbulento	0.008	1.985	0.004	0.992	0.006	1.489	0.007	1.737
178	32.4	0.0000076412	4.84	7464.98	Turbulento	0.012	2.344	0.006	1.172	0.007	1.367	0.012	2.344
179	33.6	0.0000074468	7.05	11161.99	Turbulento	0.019	1.748	0.007	0.644	0.009	0.828	0.018	1.656
180	33.6	0.0000074468	13.91	22028.17	Turbulento	0.066	1.559	0.028	0.661	0.026	0.614	0.065	1.535
181	33.7	0.0000074306	11.41	18109.70	Turbulento	0.047	1.649	0.02	0.702	0.03	1.053	0.045	1.579
182	33.9	0.0000073982	27.07	43137.13	Turbulento							0.23	1.435
183	33.9	0.0000073982	28.49	45400.54	Turbulento							0.248	1.397
184	33.9	0.0000073982	27.70	44143.89	Turbulento							0.232	1.382
185	33.9	0.0000073982	28.07	44723.51	Turbulento							0.245	1.422
186	31.4	0.0000078032	22.47	33940.83	Turbulento	0.167	1.513	0.061	0.553	0.089	0.806	0.161	1.459
187	31.5	0.0000077870	22.71	34377.21	Turbulento	0.174	1.543	0.071	0.630	0.094	0.834	0.153	1.357
188	31.6	0.0000077708	24.16	36656.47	Turbulento			0.072	0.564	0.085	0.666	0.183	1.433
189	31.6	0.0000077708	24.30	36866.27	Turbulento			0.082	0.635	0.088	0.681	0.19	1.471
190	31.7	0.0000077546	26.96	40983.46	Turbulento							0.226	1.422
191	31.7	0.0000077546	25.66	39009.35	Turbulento					0.072	0.500	0.2	1.389
192	31.8	0.0000077384	26.15	39832.45	Turbulento					0.093	0.622	0.197	1.318
193	31.8	0.0000077384	28.11	42818.22	Turbulento							0.246	1.424
194	31.9	0.0000077222	28.54	43578.79	Turbulento							0.251	1.408
195	32.0	0.0000077060	26.03	39829.62	Turbulento					0.09	0.607	0.216	1.457
196	31.9	0.0000077222	24.57	37513.33	Turbulento					0.084	0.636	0.192	1.454
197	31.8	0.0000077384	25.81	39321.99	Turbulento					0.093	0.638	0.204	1.400
198	31.8	0.0000077384	26.28	40036.81	Turbulento					0.107	0.708	0.205	1.357
199	31.7	0.0000077546	26.88	40864.91	Turbulento					0.103	0.652	0.225	1.424
200	31.7	0.0000077546	28.35	43098.88	Turbulento							0.243	1.382
201	31.7	0.0000077546	28.76	43726.97	Turbulento							0.251	1.387
202	32.1	0.0000076898	12.08	18520.03	Turbulento	0.05	1.567	0.02	0.627	0.023	0.721	0.048	1.504
203	32.4	0.0000076412	8.52	13148.72	Turbulento	0.027	1.700	0.01	0.630	0.02	1.259	0.024	1.511
204	32.7	0.0000075926	6.48	10056.99	Turbulento	0.015	1.635	0.006	0.654	0.015	1.635	0.016	1.744
205	33.1	0.0000075278	4.95	7752.90	Turbulento	0.01	1.866	0.004	0.746	0.006	1.119	0.009	1.679
206	33.4	0.0000074792	4.11	6484.47	Turbulento	0.008	2.161	0.003	0.811	0.004	1.081	0.007	1.891

Anexo C: Probabilidades acumuladas en la distribución normal estándar

<i>z</i>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9913
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9986	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990

Anexo D: Tabla de intervalo de confianza para codo 90°

Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [L/min]	Coef. de resistencia						
			Codo 90°	K_pred	Residual	Desv. Est	Int. Conf. 95%	K_sup	K_inf
0.77077	0.000196	11.768	1.585	1.611	-0.026	0.125	0.245	1.855	1.366
1.12032	0.000285	17.105	1.563	1.502	0.060			1.747	1.258
1.24205	0.000316	18.964	1.589	1.474	0.115			1.718	1.229
1.33327	0.000339	20.356	1.633	1.454	0.178			1.699	1.210
1.42146	0.000362	21.703	1.563	1.437	0.126			1.682	1.193
1.45801	0.000371	22.261	1.532	1.430	0.101			1.675	1.186
0.39722	0.000101	6.065	1.989	1.822	0.167			2.067	1.577
0.47611	0.000121	7.269	1.817	1.762	0.055			2.006	1.517
0.55550	0.000141	8.481	1.653	1.712	-0.059			1.956	1.467
0.60029	0.000153	9.165	1.796	1.687	0.109			1.932	1.443
0.81831	0.000208	12.494	1.699	1.593	0.106			1.837	1.348
0.85791	0.000218	13.099	1.519	1.579	-0.060			1.823	1.334
1.05148	0.000268	16.054	1.668	1.520	0.147			1.765	1.276
1.05342	0.000268	16.084	1.661	1.520	0.142			1.764	1.275
1.22810	0.000313	18.751	1.456	1.477	-0.020			1.722	1.232
1.26361	0.000322	19.293	1.560	1.469	0.091			1.714	1.224
1.26886	0.000323	19.373	1.632	1.468	0.164			1.713	1.223
1.29502	0.000330	19.773	1.380	1.462	-0.082			1.707	1.218
1.35160	0.000344	20.636	1.610	1.451	0.160			1.695	1.206
1.43876	0.000366	21.967	1.563	1.434	0.129			1.679	1.189
1.45991	0.000372	22.290	1.546	1.430	0.116			1.675	1.186
1.48351	0.000378	22.650	1.551	1.426	0.125			1.671	1.181
0.56523	0.000144	8.630	1.658	1.706	-0.049			1.951	1.462
1.10633	0.000282	16.892	1.538	1.506	0.032			1.750	1.261
1.22341	0.000311	18.679	1.573	1.478	0.095			1.723	1.233
1.30017	0.000331	19.851	1.706	1.461	0.244			1.706	1.217
1.38523	0.000352	21.150	1.411	1.444	-0.034			1.689	1.200
1.39103	0.000354	21.238	1.642	1.443	0.199			1.688	1.198
0.36622	0.000093	5.592	2.194	1.850	0.344			2.094	1.605
0.46101	0.000117	7.039	2.030	1.772	0.258			2.017	1.528
0.68279	0.000174	10.425	1.725	1.647	0.078			1.892	1.403
0.88323	0.000225	13.485	1.710	1.570	0.139			1.815	1.326
1.14658	0.000292	17.506	1.641	1.496	0.145			1.741	1.251
1.28543	0.000327	19.626	1.448	1.464	-0.016			1.709	1.220
1.36420	0.000347	20.829	1.591	1.448	0.143			1.693	1.204
0.29705	0.000076	4.535	2.000	1.923	0.077			2.168	1.678
0.38262	0.000097	5.842	1.876	1.835	0.041			2.079	1.590
0.48125	0.000122	7.348	1.694	1.758	-0.064			2.003	1.513
0.57443	0.000146	8.771	1.783	1.701	0.082			1.946	1.456
0.64685	0.000165	9.876	1.594	1.664	-0.070			1.909	1.419
0.81429	0.000207	12.433	1.627	1.594	0.033			1.839	1.350
0.97425	0.000248	14.875	1.570	1.542	0.029			1.787	1.297
1.22853	0.000313	18.757	1.598	1.477	0.122			1.721	1.232
1.28036	0.000326	19.549	1.579	1.465	0.114			1.710	1.221
1.33308	0.000339	20.354	1.633	1.455	0.179			1.699	1.210
1.41506	0.000360	21.605	1.577	1.438	0.139			1.683	1.194
1.46202	0.000372	22.322	1.569	1.430	0.139			1.674	1.185
0.31779	0.000081	4.852	1.942	1.899	0.043			2.144	1.654
0.37141	0.000095	5.671	1.848	1.845	0.004			2.089	1.600
0.40697	0.000104	6.214	1.776	1.814	-0.037			2.058	1.569
0.52014	0.000132	7.942	1.667	1.733	-0.065			1.977	1.488
0.66642	0.000170	10.175	1.722	1.655	0.068			1.899	1.410
0.83242	0.000212	12.709	1.585	1.588	-0.003			1.832	1.343

0.84477	0.000215	12.898	1.429	1.583	-0.154	1.828	1.339
0.99828	0.000254	15.242	1.496	1.535	-0.039	1.780	1.290
1.45126	0.000369	22.158	1.564	1.432	0.133	1.676	1.187
0.88857	0.000226	13.567	1.565	1.569	-0.004	1.813	1.324
1.43693	0.000366	21.939	1.548	1.434	0.114	1.679	1.190
1.35290	0.000344	20.656	1.564	1.451	0.114	1.695	1.206
1.11222	0.000283	16.982	1.776	1.504	0.271	1.749	1.260
1.17657	0.000299	17.964	1.757	1.489	0.268	1.733	1.244
1.24549	0.000317	19.016	1.467	1.473	-0.006	1.718	1.228
1.08035	0.000275	16.495	1.479	1.513	-0.034	1.757	1.268
0.95743	0.000244	14.618	1.498	1.547	-0.049	1.792	1.302
0.87471	0.000223	13.355	1.538	1.573	-0.035	1.818	1.328
0.69394	0.000177	10.595	1.629	1.642	-0.013	1.887	1.398
1.79168	0.000456	27.356		1.377		1.621	1.132
1.85069	0.000471	28.257		1.368		1.613	1.124
1.43334	0.000365	21.884	1.623	1.435	0.188	1.680	1.190
1.40090	0.000356	21.389	1.689	1.441	0.248	1.686	1.197
1.32448	0.000337	20.222	1.688	1.456	0.232	1.701	1.212
1.30078	0.000331	19.860	1.449	1.461	-0.012	1.706	1.217
1.24538	0.000317	19.015	1.518	1.473	0.044	1.718	1.228
1.09008	0.000277	16.644	1.568	1.510	0.058	1.755	1.265
0.97110	0.000247	14.827	1.643	1.543	0.100	1.787	1.298
0.80840	0.000206	12.343	1.621	1.596	0.024	1.841	1.352
0.69027	0.000176	10.539	1.605	1.644	-0.039	1.889	1.399
0.52860	0.000135	8.071	1.685	1.728	-0.043	1.972	1.483
0.37719	0.000096	5.759	1.792	1.840	-0.047	2.084	1.595
0.28116	0.000072	4.293	1.985	1.943	0.042	2.187	1.698
0.31690	0.000081	4.838	2.344	1.900	0.444	2.145	1.655
0.46178	0.000118	7.051	1.748	1.772	-0.024	2.016	1.527
0.91133	0.000232	13.914	1.559	1.561	-0.003	1.806	1.317
0.74759	0.000190	11.414	1.649	1.620	0.030	1.864	1.375
1.77298	0.000451	27.070		1.379		1.624	1.135
1.86601	0.000475	28.491		1.366		1.611	1.122
1.81436	0.000462	27.702		1.373		1.618	1.129
1.83819	0.000468	28.066		1.370		1.615	1.126
1.47137	0.000374	22.465	1.513	1.428	0.085	1.673	1.183
1.48720	0.000378	22.707	1.543	1.425	0.118	1.670	1.181
1.58250	0.000403	24.162		1.409		1.654	1.164
1.59156	0.000405	24.300		1.407		1.652	1.163
1.76561	0.000449	26.958		1.380		1.625	1.136
1.68057	0.000428	25.659		1.393		1.638	1.149
1.71244	0.000436	26.146		1.388		1.633	1.144
1.84080	0.000468	28.106		1.370		1.614	1.125
1.86958	0.000476	28.545		1.366		1.610	1.121
1.70515	0.000434	26.034		1.389		1.634	1.145
1.60936	0.000410	24.572		1.404		1.649	1.160
1.69050	0.000430	25.811		1.392		1.636	1.147
1.72123	0.000438	26.280		1.387		1.632	1.142
1.76051	0.000448	26.880		1.381		1.626	1.137
1.85675	0.000472	28.349		1.368		1.612	1.123

1.88381	0.000479	28.762		1.364		1.609	1.119
0.79120	0.000201	12.080	1.567	1.603	-0.036	1.847	1.358
0.55818	0.000142	8.522	1.700	1.710	-0.011	1.955	1.466
0.42422	0.000108	6.477	1.635	1.800	-0.165	2.044	1.555
0.32423	0.000083	4.950	1.866	1.892	-0.026	2.137	1.647
0.26944	0.000069	4.114	2.161	1.958	0.203	2.203	1.714
0.66756	0.000170	10.192	1.981	1.654	0.326	1.899	1.410
0.75750	0.000193	11.566	1.709	1.616	0.093	1.860	1.371
0.88376	0.000225	13.493	1.507	1.570	-0.063	1.815	1.325
0.88658	0.000226	13.536	1.722	1.569	0.153	1.814	1.325
0.92037	0.000234	14.052	1.320	1.558	-0.239	1.803	1.314
1.06127	0.000270	16.204	1.471	1.518	-0.046	1.762	1.273
1.09901	0.000280	16.780	1.299	1.508	-0.209	1.752	1.263
1.10645	0.000282	16.893	1.218	1.506	-0.288	1.750	1.261
1.11295	0.000283	16.993	1.346	1.504	-0.158	1.749	1.260
0.73486	0.000187	11.220	1.634	1.625	0.009	1.870	1.380
0.82349	0.000210	12.573	1.388	1.591	-0.203	1.836	1.346
0.82443	0.000210	12.588	1.703	1.591	0.112	1.835	1.346
0.83173	0.000212	12.699	1.276	1.588	-0.312	1.833	1.343
0.99192	0.000252	15.145	1.336	1.537	-0.201	1.781	1.292
1.07557	0.000274	16.422	1.356	1.514	-0.157	1.758	1.269
1.14701	0.000292	17.513	1.386	1.496	-0.109	1.740	1.251
0.73455	0.000187	11.215	1.454	1.625	-0.171	1.870	1.380
0.80107	0.000204	12.231	1.498	1.599	-0.101	1.844	1.354
0.84740	0.000216	12.938	1.584	1.582	0.002	1.827	1.338
0.93990	0.000239	14.350	1.532	1.552	-0.020	1.797	1.308
1.01275	0.000258	15.463	1.396	1.531	-0.135	1.775	1.286
1.06737	0.000272	16.297	1.171	1.516	-0.345	1.761	1.271
1.11679	0.000284	17.051	1.258	1.503	-0.245	1.748	1.259
0.94612	0.000241	14.446	1.512	1.550	-0.038	1.795	1.306
0.98960	0.000252	15.109	1.402	1.537	-0.135	1.782	1.293
1.07119	0.000273	16.355	1.197	1.515	-0.318	1.760	1.270
1.08891	0.000277	16.626	1.290	1.510	-0.220	1.755	1.266
1.10291	0.000281	16.839	1.483	1.507	-0.023	1.751	1.262
1.11734	0.000284	17.060	1.414	1.503	-0.089	1.748	1.258
1.16350	0.000296	17.764	1.420	1.492	-0.072	1.736	1.247
1.37761	0.000351	21.034	1.468	1.446	0.022	1.690	1.201
0.95273	0.000242	14.546	1.405	1.548	-0.144	1.793	1.304
0.95697	0.000244	14.611	1.392	1.547	-0.155	1.792	1.302
1.01130	0.000257	15.441	1.342	1.531	-0.189	1.776	1.287
1.04986	0.000267	16.029	1.335	1.521	-0.186	1.765	1.276
1.12021	0.000285	17.103	1.360	1.502	-0.143	1.747	1.258
1.18011	0.000300	18.018	1.267	1.488	-0.220	1.733	1.243
0.85692	0.000218	13.084	1.442	1.579	-0.137	1.824	1.335
1.01309	0.000258	15.468	1.357	1.531	-0.174	1.775	1.286
1.01911	0.000259	15.560	1.435	1.529	-0.094	1.774	1.284
1.07388	0.000273	16.396	1.276	1.514	-0.239	1.759	1.270
1.10065	0.000280	16.805	1.506	1.507	-0.002	1.752	1.263
1.13411	0.000289	17.316	1.449	1.499	-0.050	1.744	1.254
1.16800	0.000297	17.833	1.409	1.491	-0.082	1.735	1.246

1.17889	0.000300	17.999	1.369	1.488	-0.119	1.733	1.244
1.26270	0.000321	19.279	1.378	1.469	-0.092	1.714	1.225
1.41524	0.000360	21.608	1.351	1.438	-0.087	1.683	1.194
1.45878	0.000371	22.273	1.447	1.430	0.017	1.675	1.186
1.10377	0.000281	16.853	1.529	1.507	0.023	1.751	1.262
1.17487	0.000299	17.938	1.506	1.489	0.017	1.734	1.244
1.26261	0.000321	19.278	1.439	1.469	-0.030	1.714	1.225
1.26939	0.000323	19.381	1.339	1.468	-0.129	1.712	1.223
1.28339	0.000327	19.595	1.429	1.465	-0.036	1.709	1.220
1.32916	0.000338	20.294	1.510	1.455	0.055	1.700	1.211
1.34328	0.000342	20.509	1.467	1.452	0.015	1.697	1.208
1.34996	0.000344	20.611	1.442	1.451	-0.009	1.696	1.206
1.36196	0.000347	20.795	1.438	1.449	-0.011	1.693	1.204
1.36296	0.000347	20.810	1.478	1.449	0.030	1.693	1.204
1.36329	0.000347	20.815	1.488	1.448	0.039	1.693	1.204
1.37108	0.000349	20.934	1.356	1.447	-0.091	1.692	1.202
1.38402	0.000352	21.131	1.526	1.444	0.081	1.689	1.200
1.38505	0.000352	21.147	1.513	1.444	0.069	1.689	1.200
1.38555	0.000353	21.155	1.369	1.444	-0.075	1.689	1.199
1.41472	0.000360	21.600	1.392	1.439	-0.047	1.683	1.194
1.41501	0.000360	21.605	1.440	1.438	0.001	1.683	1.194
1.43380	0.000365	21.891	1.488	1.435	0.053	1.680	1.190
1.46393	0.000373	22.352	1.437	1.429	0.007	1.674	1.185
1.46883	0.000374	22.426	1.427	1.429	-0.001	1.673	1.184
1.47014	0.000374	22.446	1.443	1.428	0.015	1.673	1.184
1.47965	0.000377	22.591	1.353	1.427	-0.074	1.671	1.182
1.51067	0.000384	23.065	1.315	1.421	-0.106	1.666	1.176
1.53963	0.000392	23.507	1.349	1.416	-0.067	1.661	1.171
0.80990	0.000206	12.366	1.764	1.596	0.168	1.840	1.351
0.87778	0.000223	13.402	1.731	1.572	0.159	1.817	1.327
0.93598	0.000238	14.291	1.433	1.553	-0.121	1.798	1.309
0.98751	0.000251	15.077	1.689	1.538	0.151	1.783	1.293
0.99017	0.000252	15.118	1.600	1.537	0.063	1.782	1.293
1.00956	0.000257	15.414	1.616	1.532	0.085	1.776	1.287
1.05731	0.000269	16.143	1.474	1.519	-0.045	1.763	1.274
1.10467	0.000281	16.866	1.559	1.506	0.053	1.751	1.262
1.11568	0.000284	17.034	1.481	1.504	-0.022	1.748	1.259
1.16973	0.000298	17.860	1.505	1.490	0.015	1.735	1.246
1.23162	0.000313	18.805	1.526	1.476	0.050	1.721	1.231
1.27001	0.000323	19.391	1.411	1.468	-0.057	1.712	1.223
1.28039	0.000326	19.549	1.567	1.465	0.102	1.710	1.221
1.37271	0.000349	20.959	1.124	1.447	-0.323	1.691	1.202
1.48664	0.000378	22.698	1.464	1.425	0.039	1.670	1.181
0.59066	0.000150	9.018	1.799	1.692	0.107	1.937	1.448
0.68569	0.000174	10.469	1.460	1.646	-0.186	1.891	1.401
0.69200	0.000176	10.566	1.597	1.643	-0.046	1.888	1.399
0.85175	0.000217	13.005	1.622	1.581	0.041	1.826	1.336
0.94530	0.000241	14.433	1.427	1.551	-0.124	1.795	1.306
1.28846	0.000328	19.672	1.512	1.464	0.048	1.708	1.219
1.34551	0.000342	20.543	1.376	1.452	-0.076	1.697	1.207

1.41258	0.000359	21.567	1.406	1.439	-0.033	1.684	1.194
1.46943	0.000374	22.435	1.363	1.428	-0.066	1.673	1.184
1.49444	0.000380	22.817	1.484	1.424	0.060	1.669	1.179
0.77077	0.000196	11.768	1.519	1.611	-0.092	1.855	1.366
1.12032	0.000285	17.105	1.531	1.502	0.029	1.747	1.258
1.24205	0.000316	18.964	1.399	1.474	-0.075	1.718	1.229
1.33327	0.000339	20.356	1.501	1.454	0.046	1.699	1.210
1.42146	0.000362	21.703	1.359	1.437	-0.078	1.682	1.193
1.45801	0.000371	22.261	1.449	1.430	0.018	1.675	1.186
0.39722	0.000101	6.065	2.113	1.822	0.291	2.067	1.577
0.47611	0.000121	7.269	1.730	1.762	-0.031	2.006	1.517
0.55550	0.000141	8.481	1.716	1.712	0.004	1.956	1.467
0.60029	0.000153	9.165	1.742	1.687	0.055	1.932	1.443
0.81831	0.000208	12.494	1.670	1.593	0.077	1.837	1.348
0.85791	0.000218	13.099	1.439	1.579	-0.140	1.823	1.334
1.05148	0.000268	16.054	1.703	1.520	0.183	1.765	1.276
1.05342	0.000268	16.084	1.679	1.520	0.159	1.764	1.275
1.22810	0.000313	18.751	1.508	1.477	0.032	1.722	1.232
1.26361	0.000322	19.293	1.413	1.469	-0.056	1.714	1.224
1.26886	0.000323	19.373	1.401	1.468	-0.067	1.713	1.223
1.29502	0.000330	19.773	1.345	1.462	-0.117	1.707	1.218
1.35160	0.000344	20.636	1.482	1.451	0.031	1.695	1.206
1.43876	0.000366	21.967	1.412	1.434	-0.022	1.679	1.189
1.45991	0.000372	22.290	1.344	1.430	-0.087	1.675	1.186
1.48351	0.000378	22.650	1.453	1.426	0.027	1.671	1.181
0.56523	0.000144	8.630	1.596	1.706	-0.110	1.951	1.462
1.10633	0.000282	16.892	1.570	1.506	0.065	1.750	1.261
1.22341	0.000311	18.679	1.559	1.478	0.081	1.723	1.233
1.30017	0.000331	19.851	1.450	1.461	-0.011	1.706	1.217
1.38523	0.000352	21.150	1.370	1.444	-0.075	1.689	1.200
1.39103	0.000354	21.238	1.520	1.443	0.077	1.688	1.198
0.36622	0.000093	5.592	2.194	1.850	0.344	2.094	1.605
0.46101	0.000117	7.039	1.938	1.772	0.166	2.017	1.528
0.68279	0.000174	10.425	1.557	1.647	-0.091	1.892	1.403
0.88323	0.000225	13.485	1.559	1.570	-0.011	1.815	1.326
1.14658	0.000292	17.506	1.567	1.496	0.071	1.741	1.251
1.28543	0.000327	19.626	1.365	1.464	-0.099	1.709	1.220
1.36420	0.000347	20.829	1.444	1.448	-0.004	1.693	1.204
0.29705	0.000076	4.535	2.223	1.923	0.300	2.168	1.678
0.38262	0.000097	5.842	2.010	1.835	0.175	2.079	1.590
0.48125	0.000122	7.348	1.863	1.758	0.105	2.003	1.513
0.57443	0.000146	8.771	1.724	1.701	0.023	1.946	1.456
0.64685	0.000165	9.876	1.500	1.664	-0.164	1.909	1.419
0.81429	0.000207	12.433	1.568	1.594	-0.026	1.839	1.350
0.97425	0.000248	14.875	1.508	1.542	-0.033	1.787	1.297
1.22853	0.000313	18.757	1.507	1.477	0.031	1.721	1.232
1.28036	0.000326	19.549	1.460	1.465	-0.006	1.710	1.221
1.33308	0.000339	20.354	1.567	1.455	0.113	1.699	1.210
1.41506	0.000360	21.605	1.499	1.438	0.060	1.683	1.194
1.46202	0.000372	22.322	1.505	1.430	0.075	1.674	1.185

0.31779	0.000081	4.852	1.942	1.899	0.043	2.144	1.654
0.37141	0.000095	5.671	1.991	1.845	0.146	2.089	1.600
0.40697	0.000104	6.214	1.895	1.814	0.081	2.058	1.569
0.52014	0.000132	7.942	1.595	1.733	-0.138	1.977	1.488
0.66642	0.000170	10.175	1.546	1.655	-0.109	1.899	1.410
0.83242	0.000212	12.709	1.528	1.588	-0.059	1.832	1.343
0.84477	0.000215	12.898	1.512	1.583	-0.072	1.828	1.339
0.99828	0.000254	15.242	1.417	1.535	-0.118	1.780	1.290
1.45126	0.000369	22.158	1.350	1.432	-0.081	1.676	1.187
0.88857	0.000226	13.567	1.689	1.569	0.121	1.813	1.324
1.43693	0.000366	21.939	1.406	1.434	-0.029	1.679	1.190
1.35290	0.000344	20.656	1.479	1.451	0.028	1.695	1.206
1.11222	0.000283	16.982	1.744	1.504	0.240	1.749	1.260
1.17657	0.000299	17.964	1.615	1.489	0.126	1.733	1.244
1.24549	0.000317	19.016	1.492	1.473	0.019	1.718	1.228
1.08035	0.000275	16.495	1.479	1.513	-0.034	1.757	1.268
0.95743	0.000244	14.618	1.455	1.547	-0.092	1.792	1.302
0.87471	0.000223	13.355	1.641	1.573	0.067	1.818	1.328
0.69394	0.000177	10.595	1.466	1.642	-0.176	1.887	1.398
1.79168	0.000456	27.356	1.466	1.377	0.090	1.621	1.132
1.85069	0.000471	28.257	1.392	1.368	0.023	1.613	1.124
1.43334	0.000365	21.884	1.537	1.435	0.102	1.680	1.190
1.40090	0.000356	21.389	1.559	1.441	0.118	1.686	1.197
1.32448	0.000337	20.222	1.521	1.456	0.064	1.701	1.212
1.30078	0.000331	19.860	1.530	1.461	0.069	1.706	1.217
1.24538	0.000317	19.015	1.454	1.473	-0.019	1.718	1.228
1.09008	0.000277	16.644	1.452	1.510	-0.058	1.755	1.265
0.97110	0.000247	14.827	1.622	1.543	0.079	1.787	1.298
0.80840	0.000206	12.343	1.561	1.596	-0.036	1.841	1.352
0.69027	0.000176	10.539	1.482	1.644	-0.162	1.889	1.399
0.52860	0.000135	8.071	1.544	1.728	-0.183	1.972	1.483
0.37719	0.000096	5.759	1.654	1.840	-0.185	2.084	1.595
0.28116	0.000072	4.293	1.737	1.943	-0.206	2.187	1.698
0.31690	0.000081	4.838	2.344	1.900	0.444	2.145	1.655
0.46178	0.000118	7.051	1.656	1.772	-0.116	2.016	1.527
0.91133	0.000232	13.914	1.535	1.561	-0.026	1.806	1.317
0.74759	0.000190	11.414	1.579	1.620	-0.041	1.864	1.375
1.77298	0.000451	27.070	1.435	1.379	0.056	1.624	1.135
1.86601	0.000475	28.491	1.397	1.366	0.031	1.611	1.122
1.81436	0.000462	27.702	1.382	1.373	0.009	1.618	1.129
1.83819	0.000468	28.066	1.422	1.370	0.052	1.615	1.126
1.47137	0.000374	22.465	1.459	1.428	0.031	1.673	1.183
1.48720	0.000378	22.707	1.357	1.425	-0.068	1.670	1.181
1.58250	0.000403	24.162	1.433	1.409	0.024	1.654	1.164
1.59156	0.000405	24.300	1.471	1.407	0.064	1.652	1.163
1.76561	0.000449	26.958	1.422	1.380	0.041	1.625	1.136
1.68057	0.000428	25.659	1.389	1.393	-0.004	1.638	1.149
1.71244	0.000436	26.146	1.318	1.388	-0.071	1.633	1.144
1.84080	0.000468	28.106	1.424	1.370	0.054	1.614	1.125
1.86958	0.000476	28.545	1.408	1.366	0.043	1.610	1.121

1.70515	0.000434	26.034	1.457	1.389	0.068	1.634	1.145
1.60936	0.000410	24.572	1.454	1.404	0.049	1.649	1.160
1.69050	0.000430	25.811	1.400	1.392	0.008	1.636	1.147
1.72123	0.000438	26.280	1.357	1.387	-0.030	1.632	1.142
1.76051	0.000448	26.880	1.424	1.381	0.043	1.626	1.137
1.85675	0.000472	28.349	1.382	1.368	0.015	1.612	1.123
1.88381	0.000479	28.762	1.387	1.364	0.023	1.609	1.119
0.79120	0.000201	12.080	1.504	1.603	-0.099	1.847	1.358
0.55818	0.000142	8.522	1.511	1.710	-0.199	1.955	1.466
0.42422	0.000108	6.477	1.744	1.800	-0.056	2.044	1.555
0.32423	0.000083	4.950	1.679	1.892	-0.213	2.137	1.647
0.26944	0.000069	4.114	1.891	1.958	-0.067	2.203	1.714

Anexo E: Tabla de intervalo de confianza para codo 45°

Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [L/min]	Coef. de resistencia						
			Codo 45°	K_pred	Residual	Desv. Est	Int. Conf. 95%	K_sup	K_inf
0.66756	0.000170	10.192	1.100	0.802	0.298	0.128	0.252	1.054	0.551
0.75750	0.000193	11.566	0.855	0.769	0.086			1.021	0.517
0.88376	0.000225	13.493	0.879	0.730	0.149			0.982	0.478
0.88658	0.000226	13.536	0.948	0.729	0.219			0.981	0.477
0.92037	0.000234	14.052	0.880	0.720	0.160			0.972	0.468
1.06127	0.000270	16.204	0.818	0.686	0.132			0.938	0.434
1.09901	0.000280	16.780	0.682	0.678	0.004			0.930	0.426
1.10645	0.000282	16.893	0.801	0.676	0.125			0.928	0.425
1.11295	0.000283	16.993	0.713	0.675	0.037			0.927	0.423
0.73486	0.000187	11.220	0.799	0.777	0.022			1.029	0.525
0.82349	0.000210	12.573	0.723	0.747	-0.024			0.999	0.496
0.82443	0.000210	12.588	1.010	0.747	0.263			0.999	0.495
0.83173	0.000212	12.699	0.766	0.745	0.021			0.997	0.493
0.99192	0.000252	15.145	0.897	0.702	0.195			0.954	0.450
1.07557	0.000274	16.422	0.763	0.683	0.080			0.935	0.431
1.14701	0.000292	17.513	0.820	0.668	0.152			0.920	0.416
0.73455	0.000187	11.215	0.909	0.777	0.132			1.029	0.525
0.80107	0.000204	12.231	0.947	0.754	0.193			1.006	0.503
0.84740	0.000216	12.938	0.956	0.740	0.216			0.992	0.488
0.93990	0.000239	14.350	0.599	0.715	-0.115			0.967	0.463
1.01275	0.000258	15.463	0.688	0.697	-0.009			0.949	0.445
1.06737	0.000272	16.297	0.740	0.685	0.056			0.937	0.433
1.11679	0.000284	17.051	0.786	0.674	0.112			0.926	0.422
0.94612	0.000241	14.446	0.898	0.713	0.185			0.965	0.461
0.98960	0.000252	15.109	0.801	0.702	0.099			0.954	0.451
1.07119	0.000273	16.355	0.718	0.684	0.034			0.936	0.432
1.08891	0.000277	16.626	0.695	0.680	0.015			0.932	0.428
1.10291	0.000281	16.839	0.838	0.677	0.161			0.929	0.425
1.11734	0.000284	17.060	0.817	0.674	0.143			0.926	0.422
1.16350	0.000296	17.764	0.695	0.665	0.030			0.917	0.413
1.37761	0.000351	21.034		0.628				0.880	0.376
0.95273	0.000242	14.546	0.540	0.712	-0.171			0.963	0.460
0.95697	0.000244	14.611	0.514	0.710	-0.196			0.962	0.459
1.01130	0.000257	15.441	0.748	0.697	0.051			0.949	0.446
1.04986	0.000267	16.029	0.783	0.689	0.094			0.940	0.437
1.12021	0.000285	17.103	0.672	0.674	-0.002			0.925	0.422
1.18011	0.000300	18.018	0.704	0.662	0.042			0.914	0.410
0.85692	0.000218	13.084	0.694	0.738	-0.043			0.989	0.486
1.01309	0.000258	15.468	0.726	0.697	0.029			0.949	0.445
1.01911	0.000259	15.560	0.699	0.696	0.003			0.947	0.444
1.07388	0.000273	16.396	0.697	0.683	0.014			0.935	0.431
1.10065	0.000280	16.805	0.729	0.678	0.051			0.930	0.426
1.13411	0.000289	17.316	0.701	0.671	0.031			0.923	0.419
1.16800	0.000297	17.833	0.647	0.664	-0.017			0.916	0.412
1.17889	0.000300	17.999	0.734	0.662	0.072			0.914	0.410
1.26270	0.000321	19.279	0.664	0.647	0.017			0.899	0.395
1.41524	0.000360	21.608	0.725	0.622	0.102			0.874	0.371
1.45878	0.000371	22.273	0.728	0.616	0.112			0.868	0.364
1.10377	0.000281	16.853	0.660	0.677	-0.017			0.929	0.425
1.17487	0.000299	17.938	0.696	0.663	0.033			0.915	0.411

1.26261	0.000321	19.278	0.627	0.647	-0.019	0.899	0.395
1.26939	0.000323	19.381	0.645	0.646	-0.001	0.898	0.394
1.28339	0.000327	19.595	0.726	0.643	0.083	0.895	0.392
1.32916	0.000338	20.294	0.722	0.636	0.086	0.888	0.384
1.34328	0.000342	20.509	0.652	0.634	0.019	0.885	0.382
1.34996	0.000344	20.611	0.721	0.632	0.089	0.884	0.381
1.36196	0.000347	20.795	0.677	0.631	0.046	0.882	0.379
1.36296	0.000347	20.810	0.623	0.630	-0.008	0.882	0.379
1.36329	0.000347	20.815	0.718	0.630	0.087	0.882	0.379
1.37108	0.000349	20.934	0.616	0.629	-0.014	0.881	0.377
1.38402	0.000352	21.131	0.737	0.627	0.110	0.879	0.375
1.38505	0.000352	21.147	0.746	0.627	0.119	0.879	0.375
1.38555	0.000353	21.155	0.490	0.627	-0.137	0.879	0.375
1.41472	0.000360	21.600	0.686	0.623	0.063	0.874	0.371
1.41501	0.000360	21.605	0.676	0.623	0.053	0.874	0.371
1.43380	0.000365	21.891	0.592	0.620	-0.028	0.872	0.368
1.46393	0.000373	22.352	0.778	0.615	0.163	0.867	0.364
1.46883	0.000374	22.426	0.736	0.615	0.122	0.867	0.363
1.47014	0.000374	22.446	0.681	0.615	0.066	0.866	0.363
1.47965	0.000377	22.591	0.645	0.613	0.032	0.865	0.361
1.51067	0.000384	23.065	0.662	0.609	0.053	0.861	0.357
1.53963	0.000392	23.507	0.629	0.605	0.024	0.857	0.353
0.80990	0.000206	12.366	0.837	0.752	0.086	1.004	0.500
0.87778	0.000223	13.402	0.789	0.732	0.058	0.983	0.480
0.93598	0.000238	14.291	0.672	0.716	-0.044	0.968	0.464
0.98751	0.000251	15.077	0.744	0.703	0.041	0.955	0.451
0.99017	0.000252	15.118	0.760	0.702	0.058	0.954	0.450
1.00956	0.000257	15.414	0.712	0.698	0.014	0.950	0.446
1.05731	0.000269	16.143	0.561	0.687	-0.126	0.939	0.435
1.10467	0.000281	16.866	0.788	0.677	0.111	0.929	0.425
1.11568	0.000284	17.034	0.693	0.675	0.019	0.926	0.423
1.16973	0.000298	17.860	0.774	0.664	0.110	0.916	0.412
1.23162	0.000313	18.805	0.737	0.652	0.085	0.904	0.401
1.27001	0.000323	19.391	0.608	0.646	-0.038	0.898	0.394
1.28039	0.000326	19.549	0.694	0.644	0.050	0.896	0.392
1.37271	0.000349	20.959	0.666	0.629	0.037	0.881	0.377
1.48664	0.000378	22.698	0.666	0.612	0.053	0.864	0.360
0.59066	0.000150	9.018	1.068	0.836	0.232	1.088	0.585
0.68569	0.000174	10.469	0.834	0.795	0.039	1.047	0.543
0.69200	0.000176	10.566	0.860	0.793	0.067	1.045	0.541
0.85175	0.000217	13.005	0.946	0.739	0.207	0.991	0.487
0.94530	0.000241	14.433	0.658	0.713	-0.055	0.965	0.462
1.28846	0.000328	19.672	0.662	0.643	0.019	0.894	0.391
1.34551	0.000342	20.543	0.650	0.633	0.017	0.885	0.381
1.41258	0.000359	21.567	0.609	0.623	-0.013	0.875	0.371
1.46943	0.000374	22.435	0.636	0.615	0.021	0.866	0.363
1.49444	0.000380	22.817	0.641	0.611	0.030	0.863	0.359
0.77077	0.000196	11.768	0.792	0.764	0.028	1.016	0.513
1.12032	0.000285	17.105	0.672	0.674	-0.002	0.925	0.422
1.24205	0.000316	18.964	0.737	0.651	0.087	0.902	0.399
1.33327	0.000339	20.356	0.629	0.635	-0.006	0.887	0.383
1.42146	0.000362	21.703	0.631	0.622	0.009	0.873	0.370
1.45801	0.000371	22.261	0.609	0.616	-0.007	0.868	0.364
0.39722	0.000101	6.065	0.994	0.956	0.038	1.208	0.705
0.47611	0.000121	7.269	0.865	0.900	-0.034	1.151	0.648
0.55550	0.000141	8.481	0.699	0.854	-0.155	1.106	0.602
0.60029	0.000153	9.165	0.925	0.832	0.094	1.084	0.580
0.81831	0.000208	12.494	0.762	0.749	0.012	1.001	0.497
0.85791	0.000218	13.099	0.640	0.737	-0.098	0.989	0.485
1.05148	0.000268	16.054	0.621	0.688	-0.067	0.940	0.436

1.05342	0.000268	16.084	0.601	0.688	-0.087	0.940	0.436
1.22810	0.000313	18.751	0.611	0.653	-0.042	0.905	0.401
1.26361	0.000322	19.293	0.590	0.647	-0.057	0.899	0.395
1.26886	0.000323	19.373	0.585	0.646	-0.061	0.898	0.394
1.29502	0.000330	19.773	0.643	0.641	0.002	0.893	0.390
1.35160	0.000344	20.636	0.612	0.632	-0.020	0.884	0.380
1.43876	0.000366	21.967	0.635	0.619	0.016	0.871	0.367
1.45991	0.000372	22.290	0.607	0.616	-0.009	0.868	0.364
1.48351	0.000378	22.650	0.633	0.613	0.020	0.864	0.361
0.56523	0.000144	8.630	0.737	0.849	-0.112	1.101	0.597
1.10633	0.000282	16.892	0.673	0.676	-0.003	0.928	0.425
1.22341	0.000311	18.679	0.459	0.654	-0.195	0.906	0.402
1.30017	0.000331	19.851	0.615	0.641	-0.026	0.892	0.389
1.38523	0.000352	21.150	0.593	0.627	-0.034	0.879	0.375
1.39103	0.000354	21.238	0.659	0.626	0.033	0.878	0.374
0.36622	0.000093	5.592	1.024	0.983	0.041	1.235	0.731
0.46101	0.000117	7.039	0.923	0.909	0.013	1.161	0.658
0.68279	0.000174	10.425	0.841	0.796	0.045	1.048	0.545
0.88323	0.000225	13.485	0.679	0.730	-0.051	0.982	0.478
1.14658	0.000292	17.506	0.597	0.668	-0.072	0.920	0.417
1.28543	0.000327	19.626	0.594	0.643	-0.050	0.895	0.391
1.36420	0.000347	20.829	0.569	0.630	-0.061	0.882	0.378
0.29705	0.000076	4.535	1.334	1.055	0.279	1.307	0.803
0.38262	0.000097	5.842	1.072	0.969	0.103	1.220	0.717
0.48125	0.000122	7.348	0.593	0.896	-0.303	1.148	0.644
0.57443	0.000146	8.771	0.594	0.844	-0.250	1.096	0.592
0.64685	0.000165	9.876	0.609	0.811	-0.202	1.063	0.559
0.81429	0.000207	12.433	0.680	0.750	-0.070	1.002	0.498
0.97425	0.000248	14.875	0.579	0.706	-0.128	0.958	0.454
1.22853	0.000313	18.757	0.598	0.653	-0.055	0.905	0.401
1.28036	0.000326	19.549	0.634	0.644	-0.010	0.896	0.392
1.33308	0.000339	20.354	0.629	0.635	-0.006	0.887	0.383
1.41506	0.000360	21.605	0.597	0.622	-0.025	0.874	0.371
1.46202	0.000372	22.322	0.661	0.616	0.045	0.868	0.364
0.31779	0.000081	4.852	0.971	1.031	-0.060	1.283	0.779
0.37141	0.000095	5.671	0.711	0.978	-0.267	1.230	0.726
0.40697	0.000104	6.214	0.947	0.949	-0.001	1.200	0.697
0.52014	0.000132	7.942	0.797	0.873	-0.076	1.125	0.621
0.66642	0.000170	10.175	0.795	0.803	-0.008	1.055	0.551
0.83242	0.000212	12.709	0.736	0.745	-0.009	0.997	0.493
0.84477	0.000215	12.898	0.907	0.741	0.166	0.993	0.489
0.99828	0.000254	15.242	0.630	0.700	-0.071	0.952	0.449
1.45126	0.000369	22.158	0.577	0.617	-0.040	0.869	0.365
0.88857	0.000226	13.567	0.596	0.729	-0.132	0.980	0.477
1.43693	0.000366	21.939	0.598	0.619	-0.021	0.871	0.367
1.35290	0.000344	20.656	0.611	0.632	-0.021	0.884	0.380
1.11222	0.000283	16.982	0.888	0.675	0.213	0.927	0.423
1.17657	0.000299	17.964	0.765	0.663	0.103	0.914	0.411
1.24549	0.000317	19.016	0.607	0.650	-0.043	0.902	0.398
1.08035	0.000275	16.495	0.605	0.682	-0.077	0.934	0.430
0.95743	0.000244	14.618	0.685	0.710	-0.026	0.962	0.459
0.87471	0.000223	13.355	0.666	0.732	-0.066	0.984	0.481
0.69394	0.000177	10.595	0.652	0.792	-0.140	1.044	0.540
1.79168	0.000456	27.356		0.575		0.827	0.323
1.85069	0.000471	28.257		0.569		0.820	0.317
1.43334	0.000365	21.884	0.630	0.620	0.010	0.872	0.368
1.40090	0.000356	21.389	0.650	0.625	0.025	0.876	0.373
1.32448	0.000337	20.222	0.559	0.637	-0.078	0.888	0.385
1.30078	0.000331	19.860	0.638	0.640	-0.003	0.892	0.389
1.24538	0.000317	19.015	0.607	0.650	-0.043	0.902	0.398

1.09008	0.000277	16.644	0.578	0.680	-0.102	0.932	0.428
0.97110	0.000247	14.827	0.666	0.707	-0.041	0.959	0.455
0.80840	0.000206	12.343	0.780	0.752	0.028	1.004	0.500
0.69027	0.000176	10.539	0.741	0.793	-0.052	1.045	0.542
0.52860	0.000135	8.071	0.702	0.868	-0.166	1.120	0.616
0.37719	0.000096	5.759	0.827	0.973	-0.146	1.225	0.721
0.28116	0.000072	4.293	0.992	1.075	-0.082	1.327	0.823
0.31690	0.000081	4.838	1.172	1.032	0.140	1.284	0.780
0.46178	0.000118	7.051	0.644	0.909	-0.265	1.161	0.657
0.91133	0.000232	13.914	0.661	0.722	-0.061	0.974	0.470
0.74759	0.000190	11.414	0.702	0.772	-0.070	1.024	0.520
1.77298	0.000451	27.070		0.577		0.829	0.325
1.86601	0.000475	28.491		0.567		0.819	0.315
1.81436	0.000462	27.702		0.572		0.824	0.320
1.83819	0.000468	28.066		0.570		0.822	0.318
1.47137	0.000374	22.465	0.553	0.614	-0.062	0.866	0.362
1.48720	0.000378	22.707	0.630	0.612	0.017	0.864	0.360
1.58250	0.000403	24.162	0.564	0.599	-0.036	0.851	0.348
1.59156	0.000405	24.300	0.635	0.598	0.037	0.850	0.346
1.76561	0.000449	26.958		0.578		0.829	0.326
1.68057	0.000428	25.659		0.587		0.839	0.335
1.71244	0.000436	26.146		0.584		0.835	0.332
1.84080	0.000468	28.106		0.570		0.821	0.318
1.86958	0.000476	28.545		0.567		0.818	0.315
1.70515	0.000434	26.034		0.584		0.836	0.333
1.60936	0.000410	24.572		0.596		0.848	0.344
1.69050	0.000430	25.811		0.586		0.838	0.334
1.72123	0.000438	26.280		0.583		0.834	0.331
1.76051	0.000448	26.880		0.578		0.830	0.326
1.85675	0.000472	28.349		0.568		0.820	0.316
1.88381	0.000479	28.762		0.565		0.817	0.313
0.79120	0.000201	12.080	0.627	0.758	-0.131	1.010	0.506
0.55818	0.000142	8.522	0.630	0.852	-0.223	1.104	0.601
0.42422	0.000108	6.477	0.654	0.935	-0.281	1.187	0.684
0.32423	0.000083	4.950	0.746	1.024	-0.278	1.276	0.772
0.26944	0.000069	4.114	0.811	1.090	-0.280	1.342	0.839
0.66756	0.000170	10.192	0.660	0.802	-0.142	1.054	0.551
0.75750	0.000193	11.566	0.581	0.769	-0.188	1.021	0.517
0.88376	0.000225	13.493	1.004	0.730	0.275	0.982	0.478
0.88658	0.000226	13.536	0.873	0.729	0.144	0.981	0.477
0.92037	0.000234	14.052	0.810	0.720	0.090	0.972	0.468
1.06127	0.000270	16.204	0.575	0.686	-0.111	0.938	0.434
1.09901	0.000280	16.780	0.487	0.678	-0.191	0.930	0.426
1.10645	0.000282	16.893	0.721	0.676	0.044	0.928	0.425
1.11295	0.000283	16.993	0.633	0.675	-0.042	0.927	0.423
0.73486	0.000187	11.220	1.017	0.777	0.240	1.029	0.525
0.82349	0.000210	12.573	0.781	0.747	0.033	0.999	0.496
0.82443	0.000210	12.588	0.808	0.747	0.061	0.999	0.495
0.83173	0.000212	12.699	0.709	0.745	-0.036	0.997	0.493
0.99192	0.000252	15.145	0.917	0.702	0.215	0.954	0.450
1.07557	0.000274	16.422	0.797	0.683	0.114	0.935	0.431
1.14701	0.000292	17.513	0.626	0.668	-0.042	0.920	0.416
0.73455	0.000187	11.215	0.909	0.777	0.132	1.029	0.525
0.80107	0.000204	12.231	0.856	0.754	0.101	1.006	0.503
0.84740	0.000216	12.938	0.819	0.740	0.079	0.992	0.488
0.93990	0.000239	14.350	0.488	0.715	-0.226	0.967	0.463
1.01275	0.000258	15.463	0.765	0.697	0.068	0.949	0.445
1.06737	0.000272	16.297	0.740	0.685	0.056	0.937	0.433
1.11679	0.000284	17.051	0.629	0.674	-0.045	0.926	0.422
0.94612	0.000241	14.446	0.876	0.713	0.163	0.965	0.461

0.98960	0.000252	15.109	0.841	0.702	0.139	0.954	0.451
1.07119	0.000273	16.355	0.701	0.684	0.017	0.936	0.432
1.08891	0.000277	16.626	0.612	0.680	-0.068	0.932	0.428
1.10291	0.000281	16.839	0.677	0.677	0.000	0.929	0.425
1.11734	0.000284	17.060	0.628	0.674	-0.046	0.926	0.422
1.16350	0.000296	17.764	0.609	0.665	-0.057	0.917	0.413
1.37761	0.000351	21.034	0.579	0.628	-0.049	0.880	0.376
0.95273	0.000242	14.546	0.583	0.712	-0.128	0.963	0.460
0.95697	0.000244	14.611	0.557	0.710	-0.154	0.962	0.459
1.01130	0.000257	15.441	0.614	0.697	-0.084	0.949	0.446
1.04986	0.000267	16.029	0.427	0.689	-0.262	0.940	0.437
1.12021	0.000285	17.103	0.578	0.674	-0.095	0.925	0.422
1.18011	0.000300	18.018	0.591	0.662	-0.070	0.914	0.410
0.85692	0.000218	13.084	0.588	0.738	-0.150	0.989	0.486
1.01309	0.000258	15.468	0.631	0.697	-0.066	0.949	0.445
1.01911	0.000259	15.560	0.642	0.696	-0.053	0.947	0.444
1.07388	0.000273	16.396	0.578	0.683	-0.105	0.935	0.431
1.10065	0.000280	16.805	0.567	0.678	-0.111	0.930	0.426
1.13411	0.000289	17.316	0.579	0.671	-0.091	0.923	0.419
1.16800	0.000297	17.833	0.589	0.664	-0.075	0.916	0.412
1.17889	0.000300	17.999	0.579	0.662	-0.084	0.914	0.410
1.26270	0.000321	19.279	0.566	0.647	-0.081	0.899	0.395
1.41524	0.000360	21.608	0.715	0.622	0.092	0.874	0.371
1.45878	0.000371	22.273	0.627	0.616	0.011	0.868	0.364
1.10377	0.000281	16.853	0.531	0.677	-0.146	0.929	0.425
1.17487	0.000299	17.938	0.668	0.663	0.005	0.915	0.411
1.26261	0.000321	19.278	0.492	0.647	-0.155	0.899	0.395
1.26939	0.000323	19.381	0.402	0.646	-0.244	0.898	0.394
1.28339	0.000327	19.595	0.655	0.643	0.012	0.895	0.392
1.32916	0.000338	20.294	0.588	0.636	-0.047	0.888	0.384
1.34328	0.000342	20.509	0.457	0.634	-0.177	0.885	0.382
1.34996	0.000344	20.611	0.592	0.632	-0.041	0.884	0.381
1.36196	0.000347	20.795	0.550	0.631	-0.081	0.882	0.379
1.36296	0.000347	20.810	0.486	0.630	-0.145	0.882	0.379
1.36329	0.000347	20.815	0.665	0.630	0.034	0.882	0.379
1.37108	0.000349	20.934	0.490	0.629	-0.139	0.881	0.377
1.38402	0.000352	21.131	0.676	0.627	0.049	0.879	0.375
1.38505	0.000352	21.147	0.695	0.627	0.068	0.879	0.375
1.38555	0.000353	21.155	0.480	0.627	-0.147	0.879	0.375
1.41472	0.000360	21.600	0.784	0.623	0.161	0.874	0.371
1.41501	0.000360	21.605	0.568	0.623	-0.054	0.874	0.371
1.43380	0.000365	21.891	0.544	0.620	-0.076	0.872	0.368
1.46393	0.000373	22.352	0.677	0.615	0.062	0.867	0.364
1.46883	0.000374	22.426	0.636	0.615	0.022	0.867	0.363
1.47014	0.000374	22.446	0.608	0.615	-0.007	0.866	0.363
1.47965	0.000377	22.591	0.529	0.613	-0.085	0.865	0.361
1.51067	0.000384	23.065	0.550	0.609	-0.059	0.861	0.357
1.53963	0.000392	23.507	0.604	0.605	-0.001	0.857	0.353
0.80990	0.000206	12.366	0.688	0.752	-0.064	1.004	0.500
0.87778	0.000223	13.402	0.713	0.732	-0.019	0.983	0.480
0.93598	0.000238	14.291	0.672	0.716	-0.044	0.968	0.464
0.98751	0.000251	15.077	0.684	0.703	-0.019	0.955	0.451
0.99017	0.000252	15.118	0.700	0.702	-0.002	0.954	0.450
1.00956	0.000257	15.414	0.635	0.698	-0.063	0.950	0.446
1.05731	0.000269	16.143	0.632	0.687	-0.055	0.939	0.435
1.10467	0.000281	16.866	0.611	0.677	-0.066	0.929	0.425
1.11568	0.000284	17.034	0.646	0.675	-0.029	0.926	0.423
1.16973	0.000298	17.860	0.674	0.664	0.010	0.916	0.412
1.23162	0.000313	18.805	0.672	0.652	0.020	0.904	0.401
1.27001	0.000323	19.391	0.547	0.646	-0.098	0.898	0.394

1.28039	0.000326	19.549	0.598	0.644	-0.046	0.896	0.392
1.37271	0.000349	20.959	0.552	0.629	-0.077	0.881	0.377
1.48664	0.000378	22.698	0.559	0.612	-0.053	0.864	0.360
0.59066	0.000150	9.018	1.068	0.836	0.232	1.088	0.585
0.68569	0.000174	10.469	0.793	0.795	-0.003	1.047	0.543
0.69200	0.000176	10.566	0.860	0.793	0.067	1.045	0.541
0.85175	0.000217	13.005	0.757	0.739	0.018	0.991	0.487
0.94530	0.000241	14.433	0.615	0.713	-0.099	0.965	0.462
1.28846	0.000328	19.672	0.591	0.643	-0.052	0.894	0.391
1.34551	0.000342	20.543	0.607	0.633	-0.027	0.885	0.381
1.41258	0.000359	21.567	0.619	0.623	-0.004	0.875	0.371
1.46943	0.000374	22.435	0.618	0.615	0.003	0.866	0.363
1.49444	0.000380	22.817	0.571	0.611	-0.040	0.863	0.359
0.77077	0.000196	11.768	0.726	0.764	-0.038	1.016	0.513
1.12032	0.000285	17.105	0.578	0.674	-0.095	0.925	0.422
1.24205	0.000316	18.964	0.750	0.651	0.100	0.902	0.399
1.33327	0.000339	20.356	0.607	0.635	-0.028	0.887	0.383
1.42146	0.000362	21.703	0.670	0.622	0.048	0.873	0.370
1.45801	0.000371	22.261	0.590	0.616	-0.026	0.868	0.364
0.39722	0.000101	6.065	0.994	0.956	0.038	1.208	0.705
0.47611	0.000121	7.269	0.779	0.900	-0.121	1.151	0.648
0.55550	0.000141	8.481	0.763	0.854	-0.091	1.106	0.602
0.60029	0.000153	9.165	0.980	0.832	0.148	1.084	0.580
0.81831	0.000208	12.494	0.791	0.749	0.042	1.001	0.497
0.85791	0.000218	13.099	0.640	0.737	-0.098	0.989	0.485
1.05148	0.000268	16.054	0.639	0.688	-0.050	0.940	0.436
1.05342	0.000268	16.084	0.636	0.688	-0.052	0.940	0.436
1.22810	0.000313	18.751	0.676	0.653	0.023	0.905	0.401
1.26361	0.000322	19.293	0.602	0.647	-0.045	0.899	0.395
1.26886	0.000323	19.373	0.670	0.646	0.024	0.898	0.394
1.29502	0.000330	19.773	0.632	0.641	-0.010	0.893	0.390
1.35160	0.000344	20.636	0.601	0.632	-0.031	0.884	0.380
1.43876	0.000366	21.967	0.616	0.619	-0.003	0.871	0.367
1.45991	0.000372	22.290	0.617	0.616	0.001	0.868	0.364
1.48351	0.000378	22.650	0.561	0.613	-0.051	0.864	0.361
0.56523	0.000144	8.630	1.105	0.849	0.256	1.101	0.597
1.10633	0.000282	16.892	0.801	0.676	0.125	0.928	0.425
1.22341	0.000311	18.679	0.472	0.654	-0.182	0.906	0.402
1.30017	0.000331	19.851	0.557	0.641	-0.084	0.892	0.389
1.38523	0.000352	21.150	0.624	0.627	-0.003	0.879	0.375
1.39103	0.000354	21.238	0.628	0.626	0.002	0.878	0.374
0.36622	0.000093	5.592	1.170	0.983	0.187	1.235	0.731
0.46101	0.000117	7.039	0.831	0.909	-0.079	1.161	0.658
0.68279	0.000174	10.425	0.589	0.796	-0.207	1.048	0.545
0.88323	0.000225	13.485	0.679	0.730	-0.051	0.982	0.478
1.14658	0.000292	17.506	0.597	0.668	-0.072	0.920	0.417
1.28543	0.000327	19.626	0.558	0.643	-0.085	0.895	0.391
1.36420	0.000347	20.829	0.527	0.630	-0.103	0.882	0.378
0.29705	0.000076	4.535	1.334	1.055	0.279	1.307	0.803
0.38262	0.000097	5.842	0.938	0.969	-0.031	1.220	0.717
0.48125	0.000122	7.348	0.677	0.896	-0.219	1.148	0.644
0.57443	0.000146	8.771	0.654	0.844	-0.190	1.096	0.592
0.64685	0.000165	9.876	0.656	0.811	-0.155	1.063	0.559
0.81429	0.000207	12.433	0.799	0.750	0.048	1.002	0.498
0.97425	0.000248	14.875	0.620	0.706	-0.086	0.958	0.454
1.22853	0.000313	18.757	0.702	0.653	0.049	0.905	0.401
1.28036	0.000326	19.549	0.610	0.644	-0.034	0.896	0.392
1.33308	0.000339	20.354	0.563	0.635	-0.072	0.887	0.383
1.41506	0.000360	21.605	0.549	0.622	-0.074	0.874	0.371
1.46202	0.000372	22.322	0.633	0.616	0.017	0.868	0.364

0.31779	0.000081	4.852	0.971	1.031	-0.060	1.283	0.779
0.37141	0.000095	5.671	0.853	0.978	-0.125	1.230	0.726
0.40697	0.000104	6.214	1.184	0.949	0.236	1.200	0.697
0.52014	0.000132	7.942	0.870	0.873	-0.003	1.125	0.621
0.66642	0.000170	10.175	0.839	0.803	0.036	1.055	0.551
0.83242	0.000212	12.709	0.821	0.745	0.076	0.997	0.493
0.84477	0.000215	12.898	0.989	0.741	0.248	0.993	0.489
0.99828	0.000254	15.242	0.551	0.700	-0.149	0.952	0.449
1.45126	0.000369	22.158	0.605	0.617	-0.012	0.869	0.365
0.88857	0.000226	13.567	0.522	0.729	-0.207	0.980	0.477
1.43693	0.000366	21.939	0.589	0.619	-0.030	0.871	0.367
1.35290	0.000344	20.656	0.782	0.632	0.150	0.884	0.380
1.11222	0.000283	16.982	0.920	0.675	0.244	0.927	0.423
1.17657	0.000299	17.964	0.510	0.663	-0.153	0.914	0.411
1.24549	0.000317	19.016	0.657	0.650	0.008	0.902	0.398
1.08035	0.000275	16.495	0.941	0.682	0.259	0.934	0.430
0.95743	0.000244	14.618	1.027	0.710	0.317	0.962	0.459
0.87471	0.000223	13.355	1.077	0.732	0.344	0.984	0.481
0.69394	0.000177	10.595	1.181	0.792	0.389	1.044	0.540
1.79168	0.000456	27.356		0.575		0.827	0.323
1.85069	0.000471	28.257		0.569		0.820	0.317
1.43334	0.000365	21.884	0.659	0.620	0.039	0.872	0.368
1.40090	0.000356	21.389	0.700	0.625	0.075	0.876	0.373
1.32448	0.000337	20.222	0.458	0.637	-0.178	0.888	0.385
1.30078	0.000331	19.860	0.753	0.640	0.113	0.892	0.389
1.24538	0.000317	19.015	0.885	0.650	0.235	0.902	0.398
1.09008	0.000277	16.644	0.924	0.680	0.244	0.932	0.428
0.97110	0.000247	14.827	0.957	0.707	0.250	0.959	0.455
0.80840	0.000206	12.343	1.140	0.752	0.388	1.004	0.500
0.69027	0.000176	10.539	1.235	0.793	0.441	1.045	0.542
0.52860	0.000135	8.071	0.772	0.868	-0.096	1.120	0.616
0.37719	0.000096	5.759	1.103	0.973	0.130	1.225	0.721
0.28116	0.000072	4.293	1.489	1.075	0.414	1.327	0.823
0.31690	0.000081	4.838	1.367	1.032	0.335	1.284	0.780
0.46178	0.000118	7.051	0.828	0.909	-0.081	1.161	0.657
0.91133	0.000232	13.914	0.614	0.722	-0.108	0.974	0.470
0.74759	0.000190	11.414	1.053	0.772	0.280	1.024	0.520
1.77298	0.000451	27.070		0.577		0.829	0.325
1.86601	0.000475	28.491		0.567		0.819	0.315
1.81436	0.000462	27.702		0.572		0.824	0.320
1.83819	0.000468	28.066		0.570		0.822	0.318
1.47137	0.000374	22.465	0.806	0.614	0.192	0.866	0.362
1.48720	0.000378	22.707	0.834	0.612	0.221	0.864	0.360
1.58250	0.000403	24.162	0.666	0.599	0.066	0.851	0.348
1.59156	0.000405	24.300	0.681	0.598	0.083	0.850	0.346
1.76561	0.000449	26.958		0.578		0.829	0.326
1.68057	0.000428	25.659	0.500	0.587	-0.087	0.839	0.335
1.71244	0.000436	26.146	0.622	0.584	0.038	0.835	0.332
1.84080	0.000468	28.106		0.570		0.821	0.318
1.86958	0.000476	28.545		0.567		0.818	0.315
1.70515	0.000434	26.034	0.607	0.584	0.023	0.836	0.333
1.60936	0.000410	24.572	0.636	0.596	0.040	0.848	0.344
1.69050	0.000430	25.811	0.638	0.586	0.052	0.838	0.334
1.72123	0.000438	26.280	0.708	0.583	0.126	0.834	0.331
1.76051	0.000448	26.880	0.652	0.578	0.074	0.830	0.326
1.85675	0.000472	28.349		0.568		0.820	0.316
1.88381	0.000479	28.762		0.565		0.817	0.313
0.79120	0.000201	12.080	0.721	0.758	-0.037	1.010	0.506
0.55818	0.000142	8.522	1.259	0.852	0.407	1.104	0.601
0.42422	0.000108	6.477	1.635	0.935	0.699	1.187	0.684
0.32423	0.000083	4.950	1.119	1.024	0.095	1.276	0.772
0.26944	0.000069	4.114	1.081	1.090	-0.010	1.342	0.839