

Caracterización de coeficientes de rugosidad de conducciones de abastecimiento de agua en servicio

Isabel León Martín doctorando del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex
Luis Balairón Pérez director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex

Se presenta la metodología empleada para profundizar en el conocimiento de los coeficientes de rugosidad de conducciones de abastecimiento de agua en servicio así como resultados preliminares en función de la velocidad en la red. Se parte de datos procedentes de experimentación in situ en tramos seleccionados de redes reales, principalmente caudal, presión y cota en los extremos, diámetro y longitud. Para su tratamiento, se ha desarrollado una herramienta informática en lenguaje de programación Visual Basic con soporte para Excel que calcula y grafica la pérdida de carga, variables características del flujo y los coeficientes de rugosidad absoluta k , n de Manning y C de Hazen-Williams con su incertidumbre asociada.

Palabras clave

Rugosidad, coeficientes de rugosidad hidráulica, pérdida de carga, factor de fricción, flujo en tuberías.

Characterization of hydraulic roughness coefficients of pipes in water distribution networks

This article describes a methodology to deepen the knowledge of hydraulic roughness coefficients in water distribution networks, as well as preliminary results depending on the water flow rate. Data from selected pipes in use has been experimentally collected, mainly flow, pressure and elevation on the ends, diameter and length. In order to process them, a Visual Basic computing tool with support for Excel software has been developed. It calculates and plots head loss, flow regime variables and hydraulic roughness coefficients such as surface roughness k , n from Manning formula and C from Hazen-Williams equation with its uncertainty.

Keywords

Roughness, hydraulic roughness coefficients, head loss, friction factor, pipe flow.



1. Introducción

Los valores de los coeficientes de rugosidad empleados tradicionalmente en el diseño hidráulico de tuberías para el transporte de agua a presión, han sido fijados sin criterios uniformes y sin un apoyo experimental sólido. Esto hace que exista una gran disparidad de valores propuestos en bibliografía técnica de los parámetros representativos de la rugosidad, como puede observarse en la **Tabla 1**.

Históricamente, se ha asumido que la rugosidad es una constante que depende exclusivamente del material de la conducción. Esta premisa no ha sido demostrada, intuitivamente que puede variar en función de otros parámetros como las condiciones de flujo, el diámetro de la conducción, el tiempo en servicio de la tubería, etc. Es destacable que la estimación de la rugosidad es determinante en la optimización de los costes de una red de agua a presión.

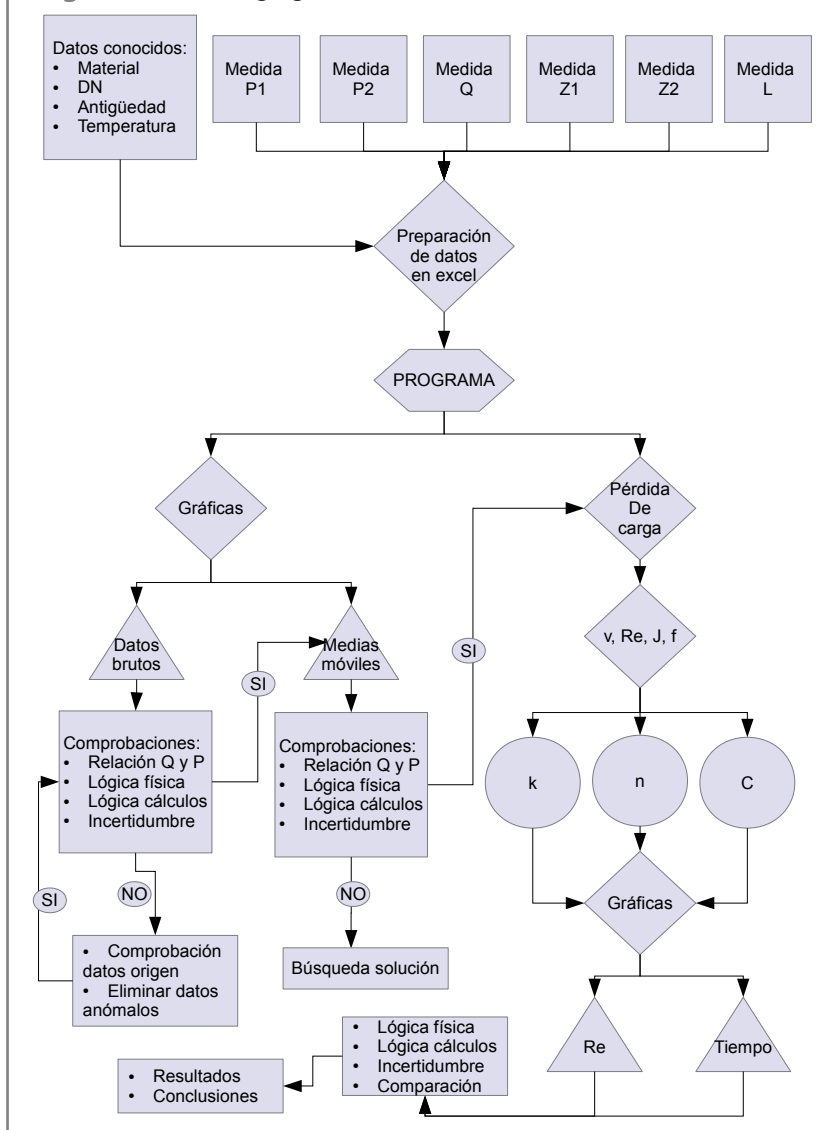
La experiencia acumulada por el Cedex en materia de normalización de conducciones se toma como base para un proyecto de investigación que, partiendo de ensayos en determinados tramos de redes de agua a presión en servicio, permita caracterizar los coeficientes de rugosidad empleados hasta la fecha.

Se presenta a continuación la metodología seguida en el citado estudio. Se parte de ensayos en tramos de redes de agua a presión en servicio, de los que se obtiene una serie de datos. Estos se analizan mediante una herramienta informática desarrollada en lenguaje de programación Visual Basic con soporte para Excel, explicándose las fórmulas en las que se basa y el algoritmo del sistema. Se muestran, además, resultados preliminares y se plantean las futuras líneas de investigación y conclusiones.

Tabla 1. Rango de valores de rugosidad absoluta k (mm), n de Manning y C de Hazen-Williams procedentes de diversas fuentes bibliográficas.

Parámetro	Rango de valores	
	Valor mínimo	Valor máximo
k	0,002	3
n	0,01	0,017
C	60	150

Figura 1. Metodología general del estudio.



2. Metodología

La metodología seguida en el estudio puede observarse en la **Figura 1**.

La caracterización experimental de los coeficientes de rugosidad se realiza a partir de ensayos *in situ* en redes de agua a presión en servicio,

más concretamente en tramos de redes de abastecimiento que cumplan los requisitos exigidos para que la pérdida de carga continua pueda ser evaluada de manera directa.

Tras la selección de los tramos, y la realización de las obras civiles

necesarias, en su caso, se obtienen medidas del caudal circulante y de las presiones y las cotas en sus extremos, así como longitud entre ellos cuando no es conocida. El material de la tubería, su DN, su antigüedad y la temperatura del agua transportada, son datos conocidos y suministrados por los gestores de la red de abastecimiento.

Con toda la información citada se prepara un archivo Excel a partir de un modelo de recogida de datos que posteriormente es tratado por una herramienta programada en lenguaje Visual Basic para Excel, denominada 'programa'. Con dicho 'programa', cuyo funcionamiento se detalla en apartados posteriores, se obtienen gráficas de los datos brutos recogidos, presiones y caudal, así como de medias móviles de los mismos. El tratamiento mediante medias móviles es un método diná-

mico consistente en promediar observaciones consecutivas con el fin de anular las variaciones aleatorias, permitiendo eliminar valores extremos debidos a errores en el instrumental entre otros factores.

'Programa' también calcula la pérdida de carga, parámetros característicos del flujo y los valores de los coeficientes de rugosidad absoluta k , n de Manning y C de Hazen-Williams, que se grafican con respecto al número de Reynolds y como serie temporal.

Partiendo de las citadas gráficas se realizan comprobaciones relativas al sentido físico del fenómeno (la relación entre el caudal y las presiones), así como a lo teóricamente esperado mediante cálculos matemáticos y la incertidumbre asociada al resultado obtenido, lo cual conduce, de manera general, a conclusiones, al cálculo de nuevas medias móviles o a la

búsqueda de datos anómalos o de tratamientos alternativos.

2.1. Obtención de datos

Los datos necesarios para el cálculo de los coeficientes de rugosidad se han obtenido a partir de experimentación *in situ*. Para evaluar las pérdidas de carga continuas, los tramos escogidos deben cumplir ciertos requisitos: ser homogéneo en material y diámetro, con ausencia, en la medida de lo posible, de discontinuidades (piezas especiales y valvulería) y de longitud suficiente para que el flujo sea estable.

La instrumentación en cada tramo ha consistido, básicamente, en un caudalímetro no intrusivo de ultrasonidos y dos sensores de presión, uno en cada extremo. En estos también se ha determinado la cota con un GPS topográfico. Algunos datos relativos a los tramos, así como ciertos valores de caudal y de presiones telecontrolados, han sido proporcionados por los gestores de las redes de abastecimiento.

Se ha conseguido reunir datos sobre tramos de fundición dúctil de diámetros comprendidos entre 100 y 1.000 mm de distintas redes de abastecimiento de agua en diferentes puntos de la geografía española.

2.2. Análisis de datos

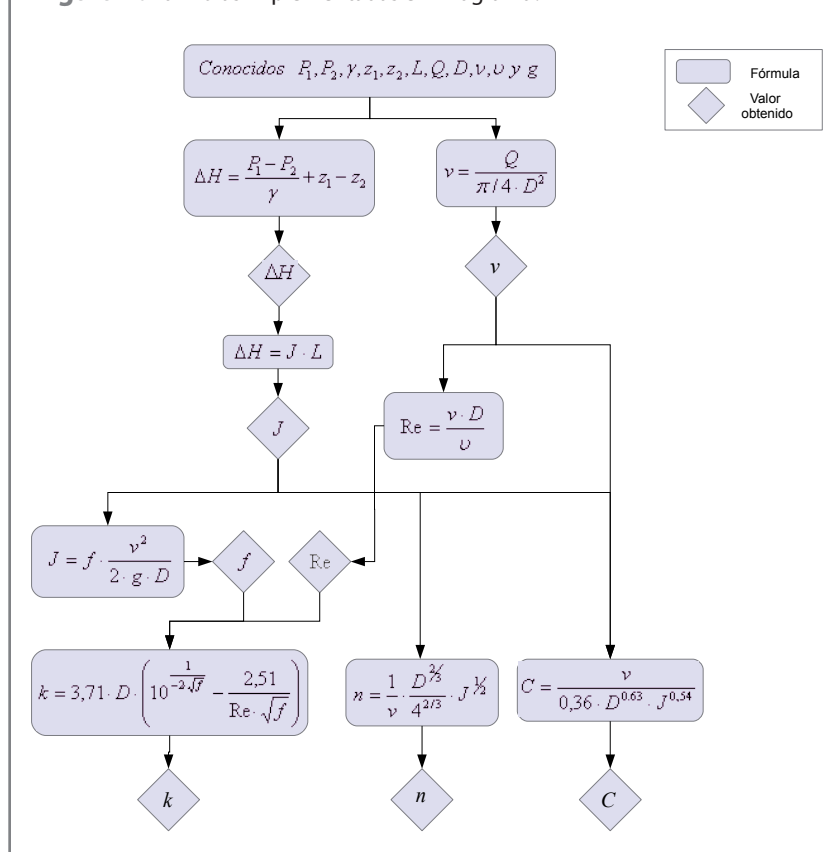
2.2.1. Fórmulas implementadas

Las fórmulas en las que se basa la herramienta 'programa' y los valores que se van obteniendo de cada una de ellas se esquematizan en la **Figura 2**. Estas expresiones matemáticas y sus variables se describen en la **Tabla 2** correspondiendo sus unidades al sistema internacional.

2.2.2. Algoritmo del sistema de análisis

Para automatizar y facilitar el tratamiento de datos se ha desarrolla-

Figura 2. Fórmulas implementadas en 'Programa'.



**Tabla 2.** Descripción de las fórmulas implementadas.

Fórmula	Descripción	Variables
$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H$	Teorema de Bernoulli	ΔH Pérdida de carga v_i Velocidad en el punto i P_i Presión en el punto i z_i Cota en el punto i g Aceleración de la gravedad γ Peso específico del fluido
$\Delta H = J \cdot L$	Pérdida de carga por unidad de longitud	J Pérdida carga/unidad longitud L Longitud del tramo
$J = f \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D}$	Fórmula teórica de Darcy-Weisbach	f Factor de fricción D Diámetro interno
$k = 3,71 \cdot D \cdot \left(10^{\frac{1}{-2 \cdot \sqrt{f}}} - \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$	Expresión de Colebrook y White	k Rugosidad absoluta Re Número de Reynolds
$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$	Número de Reynolds	ν Viscosidad cinemática
$v = \frac{1}{n} \cdot \frac{D^{2/3}}{4^{2/3}} \cdot J^{1/2}$	Ecuación empírica de Manning	n Coeficiente rugosidad Manning
$v = 0,36 \cdot C \cdot D^{0,63} \cdot J^{0,54}$	Ecuación empírica de Hazen-Williams	C Coeficiente rugosidad Hazen-Williams

do una herramienta, denominada 'programa', basada en el lenguaje de programación Visual Basic con soporte para Excel. El algoritmo que sigue 'programa' se esquematiza en la **Figura 3**.

'Programa' consta de dos formularios, el principal desde donde se realizan los cálculos y uno secundario para la impresión de los distintos gráficos generados. El formulario principal, que puede verse en la **Figura 4**, consta de 8 botones de acción, cuyo funcionamiento se detalla en los siguientes párrafos, mientras que el Excel asociado tiene 4 pestañas en las que se van generando los resultados.

Los botones son: 'Inicio', 'Calcular media móvil', 'Datos', 'Cálculos', 'Resultados', 'Gráficos', 'Guardar' y 'Borrar programa'. Las pestañas se denominan: 'Preparación_Datos', 'Datos', 'Cálculos' y 'Resultados'.

En el formulario debe introducirse

la ruta de acceso al fichero de partida y su nombre, el tamaño de ventana de la media móvil que se desea calcular y la ruta para guardar el fichero generado.

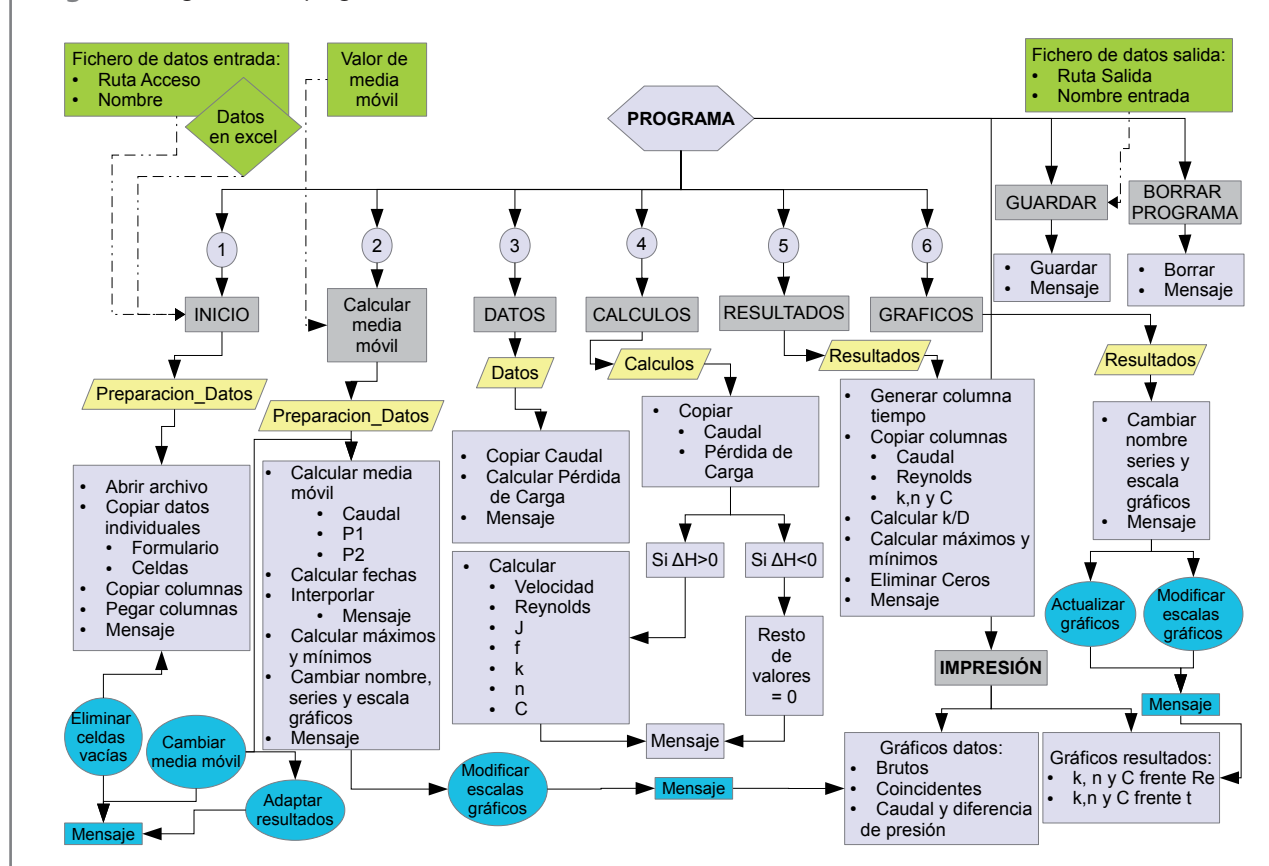
El botón 'Inicio' abre el archivo indicado según la ruta y el nombre, incluye en el formulario una serie de datos individuales (identificación, diámetro, longitud, cota en ambos extremos) y pega en la pestaña 'Preparación_Datos' del Excel todos los datos de fechas, caudal y presiones registrados, copiados desde el archivo de origen.

El botón 'Calcular media móvil', que trabaja también sobre la pestaña 'Preparación_Datos', además de calcular las medias móviles del caudal y de la presión en los dos extremos del tramo, calcula las fechas comunes de las tres variables e interpola para un determinado intervalo si hubiera un desfase de décimas de segundo en la toma de datos. También calcula

los máximos y los mínimos de todos los valores, que sirven para adaptar las escalas de los ejes de los gráficos existentes y actualiza las series y los nombres de los mismos. Los títulos de los gráficos se crean automáticamente a partir de la identificación del tramo y el tamaño de ventana de la media móvil.

El botón 'Datos' copia la columna de los valores de caudal a la hoja de 'Datos' y calcula la pérdida de carga (ΔH).

El botón 'Cálculos' traslada las dos columnas anteriores a la hoja de 'Cálculos' y, cuando la pérdida de carga es mayor que cero, calcula: velocidad (v), número de Reynolds (Re), pérdida de carga por unidad de longitud (J), factor de fricción (f) y los valores de los coeficientes de rugosidad k , n y C . Si por tratarse de datos anómalos la pérdida de carga obtenida es negativa, el programa rellena todas las celdas de las varia-

Figura 3. Algoritmo del programa de cálculo.

bles anteriores con ceros, lo cual las hace fácilmente identificables.

El botón 'Resultados', que opera en la hoja 'Resultados', genera una columna de número de observación, copia y pega los valores de caudal, Reynolds, k , n y C de la hoja de 'Cálculos' y calcula la rugosidad relativa (k/D) y los máximos y los mínimos de todas las variables citadas. También elimina los 0 generados por un valor negativo de la pérdida de carga.

El botón 'Gráficos' adapta las series, las escalas, y los títulos de los gráficos incluidos en el archivo en la hoja de 'Resultados'.

Mediante el botón 'Guardar' el Excel que se ha ido generando con el resto de los botones se guarda en la ubicación que se especifique en el formulario con el nombre del Excel de entrada precedido de VBA_.

Parte del código de programación introducido en 'Programa' se trans-

fiere al archivo Excel generado, de manera que pueden analizarse los datos cómodamente. En la hoja 'Preparación_Datos' se puede cambiar la media móvil y adaptar los resultados y los gráficos. Además, se eliminan

celdas vacías que hayan sido borradas por considerarse datos anómalos. En la hoja de resultados se actualizan los gráficos para los nuevos valores de los resultados y se pueden modificar sus escalas.

Figura 4. Formulario principal de 'Programa'.



Con el botón 'Borrar programa' se borran los datos de todas las celdas de 'Programa'.

Cuando finalizan de manera correcta todas las operaciones asociadas a un botón, 'Programa' muestra un mensaje confirmatorio.

Por otra parte, el formulario de impresión, que aparece en la **Figura 5**, permite imprimir todos los gráficos generados en la hoja 'Preparación_Datos' (a la izquierda en la figura) y en 'Resultados' (parte derecha).

En la hoja 'Preparación_Datos', los gráficos existentes son de los datos brutos de presión en los dos extremos y de caudal, así como sus medias móviles, esos mismos datos pero con fechas coincidentes, y los de las medias móviles de caudal y diferencia de presión.

En la hoja 'Resultados', los gráficos creados son los de los valores de los coeficientes de rugosidad k , n y C tanto frente al número de Reynolds como al de observaciones (serie temporal).

3. Resultados

La herramienta informática desarrollada permite, mediante el tratamiento con medias móviles, eliminar los extremos más dispares de las variables registradas, debidos a errores en el instrumental. Este suavizamiento puede observarse en la **Figura 6**.

Pese al tratamiento con medias móviles, actualmente se están obteniendo valores muy dispersos de los coeficientes de rugosidad para unas condiciones concretas, lo que hace imprescindible evaluar la incertidumbre en la determinación de estos coeficientes.

El tratamiento preliminar de los datos, realizado sin la herramienta 'Programa', y con el apoyo de los datos generados en el modelo del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del Cedex,

Figura 5. Formulario secundario de 'Programa'.

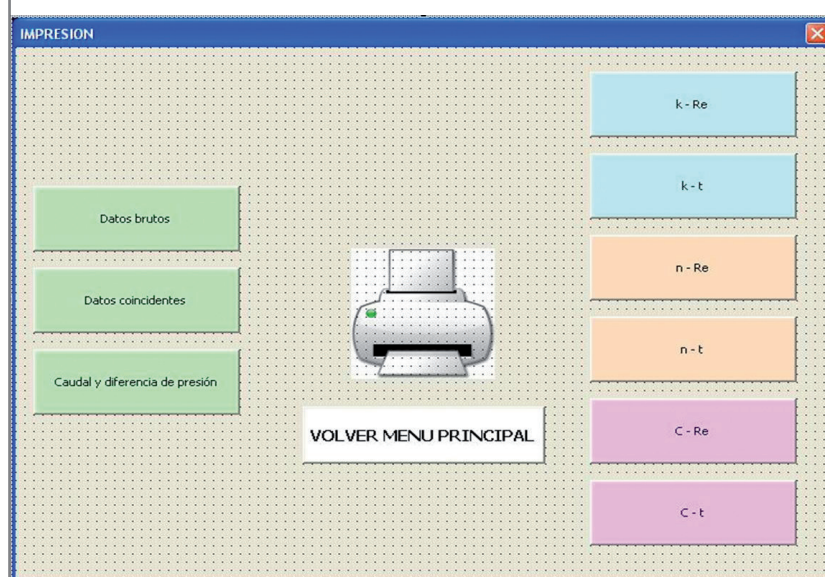
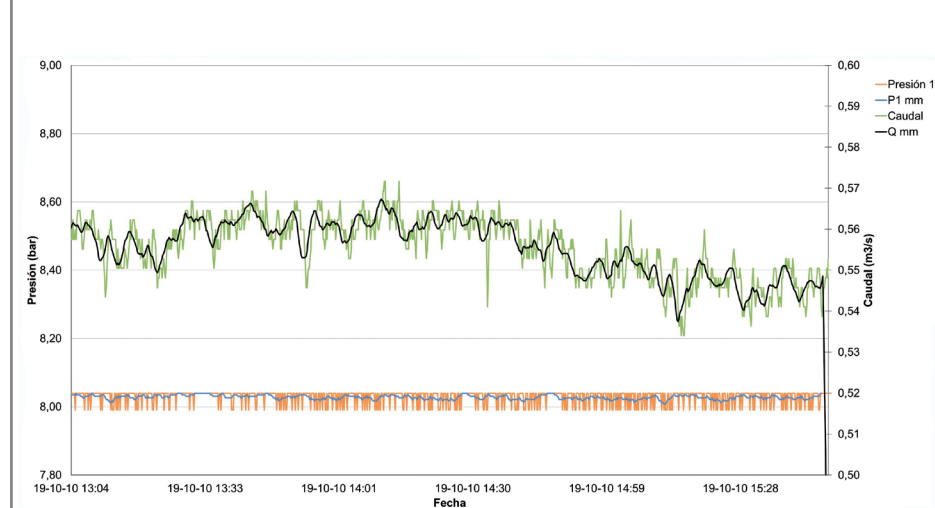


Figura 6. Suavizamiento mediante medias móviles (mm) de datos de caudal y presión.



indica que en régimen permanente existen diferencias en función de la velocidad en la red: valores de diseño habituales, valores superiores a los mismos y valores inferiores. Con velocidades de diseño habituales de aproximadamente 1 m/s, los valores de la rugosidad real son ligeramente superiores a los recomendados en bibliografía. Cuando las velocidades son mayores, los coeficientes de rugosidad se acercan más a los teóricos tradicionalmente propuestos.

Para velocidades muy pequeñas, la rugosidad real es muy elevada respecto a la teórica.

Mediante la experimentación *in situ*, tras la que se dispone de datos de conducciones en servicio de fundición dúctil con diámetros nominales comprendidos entre 100 y 1.000 mm, se observa que en la mayoría de los casos, las redes de abastecimiento no se encuentran en sus condiciones óptimas de funcionamiento sino muy por debajo de las

Para la caracterización de los coeficientes de rugosidad hidráulica de las conducciones con flujo a presión, se está desarrollando una herramienta informática sencilla, rápida y fiable, basada en lenguaje de programación Visual Basic, que puede ser muy útil para los gestores de redes de distribución de agua

mismas, situación que podría mejorar con un mayor conocimiento de la rugosidad real de las conducciones.

Estas tendencias y observaciones deben ser confirmadas con el tratamiento de los datos mediante la herramienta informática en desarrollo y el cálculo de la incertidumbre asociada a la determinación de los coeficientes de rugosidad.

4. Futuros desarrollos

Los futuros desarrollos que se plan- tean para mejorar y completar la he- rramienta informática 'Programa' se listan a continuación:

- Añadir el cálculo de la incerti- dumbre en la determinación de los coeficientes de rugosidad real partiendo de los errores del ins- trumental empleado y mostrar los valores obtenidos como barras de errores en las gráficas.
- Realizar e implementar un análisis factorial para determinar la im- portancia de cada variable en los valores de los coeficientes de ru- gosidad.
- Agregar un gráfico de la rugosidad relativa frente al número de Rey- nolds.
- Incorporar un gráfico de pérdida de carga frente al caudal.

Además, y de forma paralela, se seguirá aplicando 'Programa' a los datos obtenidos de redes reales. Se procederá al cálculo de la incerti- dumbre en cada uno de los casos.

Se compararán resultados para un mismo material y distintos diámetros y serán estudiadas sus tendencias en función de la velocidad y del número de Reynolds.

Las hipótesis e ideas que se des- prendan de redes prototipos podrían ser contrastadas con datos obteni- dos en ensayos de laboratorio bajo diferentes condiciones y también con la medida de un mayor número de tramos en redes de transporte de agua a presión para distintos regíme- nes de flujo. Sería de interés ampliar el estudio para diferentes materiales de las conducciones.

5. Conclusiones

Para la caracterización de los coefi- cientes de rugosidad hidráulica de las conducciones con flujo a presión, se está desarrollando una herramien- ta informática sencilla, rápida y fia- ble, basada en lenguaje de progra- mación Visual Basic, que puede ser muy útil para los gestores de redes de distribución de agua.

Partiendo de los datos registra- dos en los tramos, este programa con soporte para Excel permite, en la actualidad, la eliminación de da- tos extremos mediante el método de medias móviles, el cálculo de variables características del flujo y la obtención de los coeficientes de rugosidad. Además, genera gráfi- cas de los datos brutos, sus medias móviles y las rugosidades. Se imple- mentará, próximamente, el cálculo de la incertidumbre asociada a la de-

terminación de los coeficientes de la rugosidad en función de las variables de las que dependa y la contribución de cada una de ellas.

Esta herramienta permite, además de profundizar en la comprensión de los coeficientes de rugosidad hidráu- lica, conocer el funcionamiento real de las redes y realizar los ajustes co- rrespondientes en los modelos aso- ciados y en el modo de explotación de las mismas.

6. Agradecimientos

Es de agradecer la colaboración en el desarrollo del proyecto de la Em- presa Municipal de Aguas de la Co- ruña, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de La Coruña y del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñe- ría Civil.

Canal de Isabel II Gestión ha par- ticipado también activamente en el estudio a través de un convenio de colaboración denominado 'Con- venio entre Canal de Isabel II y el Centro de Estudios y Experimenta- ción de Obras Públicas (Cedex) para la colaboración en el desarrollo del "Proyecto de investigación para el estudio de la rugosidad real de con- ducciones en servicio para transpor- te de agua a presión" '.

Además, han prestado su apoyo Aguas de Barcelona y el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Castilla-La Mancha.

Bibliografía

- [1] Bombardelli, F.A. et al. (2003). Hydraulic design of large-diameter pipes. Journal of Hydraulic Engineering, págs. 839-846.
- [2] Mays, L. (2004). Water resources systems management tools. McGraw-Hill. Nueva York, Estados Unidos. ISBN: 0-07-144381-9.
- [3] Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente. Cedex. (2003). Guía Técnica sobre tuberías para transporte de agua a presión. Madrid, España. ISBN: 84-7790-384-0.
- [4] Sánchez Juny, M.; Bladé Castellet, E.; Puertas Agudo, J. (2007). Hidráulica. Manuais nº027. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. A Coruña, España. ISBN: 978-84-9749-260-7.