

REDUCCIÓN DE ERRORES DURANTE LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS PARA REDES HIDRÁULICAS A PRESIÓN

Fco. Javier Martínez Solano¹; Pedro L. Iglesias Rey¹; Gonzalo López Patiño¹;
Vicente S. Fuertes Miquel¹

Resumen – Una de las fases más importantes de la realización de un modelo es la simplificación del modelo. Durante los trabajos de simplificación se hacen hipótesis que se traducen en errores que en ocasiones pueden tener una cierta importancia. En el presente trabajo se han puesto de manifiesto los errores que se cometen cuando se procede a la simplificación de tuberías mediante asociación de series. Se comprobado que los métodos que asumen coeficientes de rugosidad constantes (sea en la ecuación de Hazen-Williams, sea en la ecuación de Darcy) producen errores que pueden llegar a ser importantes. Finalmente, se ha presentado un método de simplificación de series de tuberías con dos restricciones (pérdidas de carga y tiempo de recorrido) que da resultados exactos siempre que el sentido de circulación del flujo sea conocido.

Abstract – One of the most important stages of a model elaboration consists of the model skeletonization. During the works made for model skeletonization some assumptions are made. Most of the times, these assumptions may produce significant errors. In this paper errors derived from serial mains simplification are shown. It has been shown that methods which assume constant roughness coefficients (used in both Hazen-Williams or Darcy equations) produce errors in the headloss and travel time that can be important. Finally, a method for exact substitution of serial pipes was presented. This method imposes two restrictions (headloss and travel time) and gives exact results when the flow direction is known.

Palabras clave: Modelación de redes, esqueletización, asociación de tuberías.

¹ Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia – Camino de Vera S/N – CP 46022 – Valencia (España) – Tel: 34 96 3879890 – Fax: 34 96 3877981. E-mail: jmsolano@gmmf.upv.es; piglesia@gmmf.upv.es; glpatin@gmmf.upv.es; vfuertes@gmmf.upv.es

INTRODUCCIÓN

El modelo matemático es la base que se utiliza en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución sin tener que llegar a experimentarlos físicamente. Del resultado de dichas simulaciones se extraen luego consecuencias que serán utilizadas en la planificación y gestión de la red. De la precisión de los resultados del modelo dependerá en gran medida el éxito de las decisiones tomadas a partir de los mismos.

Sin embargo, precisión no implica cantidad de información. Por ejemplo, incluir toda la red en el modelo supone modelar hasta las acometidas de los edificios, cuya información es tan difícil de recopilar como imprecisa. La aleatoriedad en los consumos de las viviendas añadiría una incertidumbre grande en el estado de cargas del modelo, que puede poner en duda la bondad que se espera de él llegando a este grado máximo de detalle. Es preciso siempre realizar por tanto una cierta *esqueletización* del modelo.

La esqueletización de la red consiste, de alguna forma, en el tratamiento de la información de partida que permite la discriminación entre los elementos que deben formar parte del modelo de los que pueden ser obviados sin pérdida significativa de información. Se trata de simplificar por un lado el entramado de tuberías de la red y esquematizar los restantes elementos de la red.

Entre las técnicas de simplificación de la red más utilizadas se encuentran las siguientes (Cesario, 1995; López et al., 2003; Walsky et al., 2003):

- Truncamiento. Consiste en la eliminación de las tuberías que no cumplan unos requisitos mínimos de longitud o diámetro.
- Eliminación de ramas y acometidas. Se trata de eliminar las ramas con diámetros pequeños. El caudal demandado en los extremos se acumula en el punto desde donde se ha eliminado la rama.
- Unificación de nudos próximos. Los nudos cuyas tuberías de conexión son tan cortas que apenas se observa un cambio en la altura piezométrica de ambos se unen suprimiendo dicha tubería y sumando las demandas.
- Asociando tuberías en serie o en paralelo. En este caso, varias tuberías, bien dispuestas en serie, bien en paralelo, se sustituyen por una única línea equivalente.

De estas técnicas, las tres primeras suponen una pérdida de información conocida (hay tuberías que desaparecen del modelo). Sin embargo, la cuarta trata la *sustitución de tuberías* y se espera de ella un *comportamiento equivalente*.

En este artículo se revisarán las técnicas más comunes para la asociación en serie de tuberías, se evaluará el error cometido, tanto en modelos hidráulicos como en modelos de calidad y, por último, se propondrán técnicas exentas de error. El trabajo concluye con un ejemplo sencillo que pone de relieve los resultados obtenidos.

MÉTODOS EXISTENTES PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE TUBERÍAS MEDIANTE ASOCIACIÓN EN SERIE

Principio de equivalencia hidráulica

En el caso de la asociación en serie o en paralelo de tuberías se impone como criterio que la nueva tubería debe ser hidráulicamente equivalente a las sustituidas. Esto quiere decir que la nueva tubería debe presentar en todas las circunstancias las mismas pérdidas de carga que el conjunto de tuberías sustituidas. Las pérdidas de carga en una conducción, Δh , se pueden escribir de forma general como:

$$\Delta h = A \cdot L \cdot Q^B \quad (1)$$

En esta ecuación A es un coeficiente que representa la resistencia hidráulica de la tubería, L es la longitud de la misma y B es un exponente al cual se eleva el caudal. Con esta expresión general se recogen las principales ecuaciones de pérdidas de carga:

Tabla 1 – Coeficientes A y B para distintas ecuaciones de pérdidas de carga.

Formula	Coeficiente de Resistencia (A)	Exponente de Caudal (B)
Hazen-Williams	$10,646 \cdot C_{HW}^{-1,852} \cdot D^{-4,871}$	1,852
Darcy-Weisbach	$0,0826 \cdot f \cdot D^{-5}$	2
Chezy-Manning	$10,29 \cdot n^2 \cdot D^{-5,33}$	2

En las expresiones de la Tabla 1, C_{HW} es el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams; f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach; n es el coeficiente de rugosidad de Manning, y D es el diámetro de la tubería.

El uso de una u otra ecuación va ligado al ámbito geográfico. Así, en países anglosajones como el Reino Unido o los Estados Unidos predomina el uso de la ecuación de Hazen-Williams mientras que en España se utiliza más la ecuación de Darcy Weisbach.

Los defensores de la ecuación de Hazen-Williams (Rossman, 1993; Cesario, 1995; Walsky et al., 2003) alegan su facilidad de uso e integración en algoritmos de cálculo, pues las pérdidas dependen de un único coeficiente, supuesto constante, en lugar del factor de fricción, que varía en función del número de Reynolds del flujo en la tubería. Esto supone una ventaja muy importante en el caso de la asociación de tuberías. Sin embargo, como se comentará más adelante, esto conlleva un error de principio.

Simplificación de tuberías con características homogéneas.

Se trata del modo más simple y más extendido de simplificación. De hecho, se realiza casi inconscientemente desde el mismo momento en que no se representan todos y cada uno de los tramos de tubería que componen una línea. Téngase en cuenta que una línea que tenga, por ejemplo, 100 m de longitud se compondrá de varios tramos de longitud menor, pues los tubos comerciales se ofertan en longitudes muy pequeñas para lo que es el tamaño de una red.

En estos casos, la simplificación consistirá en tomar una única conducción con las mismas características que las que se van a simplificar, y una longitud igual a la suma de ambas. Si existen consumos intermedios, aparecen varias alternativas. La más extendida es la de hacer un reparto al 50% entre los nudos extremos (Walsky et al., 2003). Esta opción, como se verá más adelante, presenta un pequeño error en cuanto al cálculo de la pérdida de carga.

En muchas ocasiones, tras la asociación de tuberías quedan consumos intermedios que están distribuidos a lo largo de las conducciones de una forma más o menos uniforme. En estos casos, la simplificación debería incluir un reparto de caudales que contemple tanto estos consumos repartidos (q_2 y q_3 en la Figura 1) como los consumos puntuales (Q_I en dicha figura). Pérez (1993) presenta algunas ecuaciones para el reparto de consumos uniformemente distribuidos que resultan de gran utilidad cuando se integra esta simplificación en un SIG.

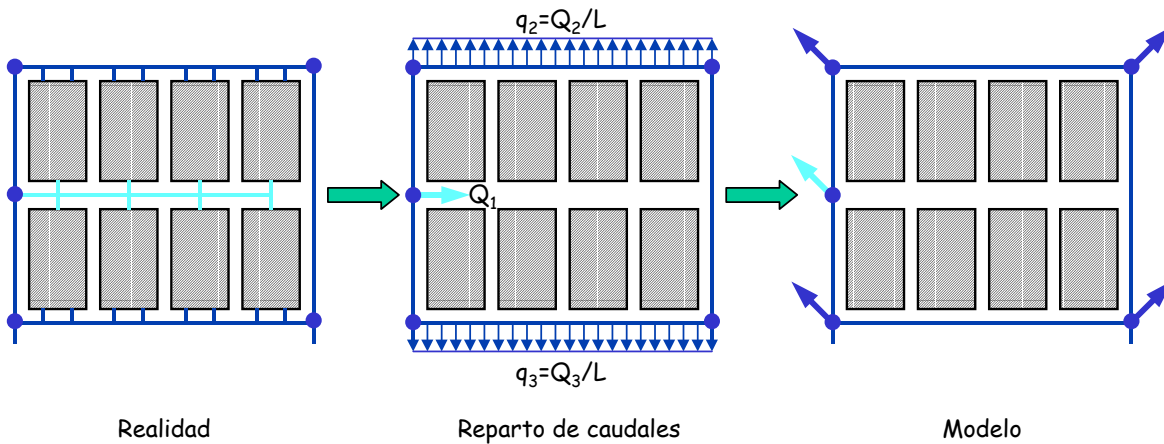


Figura 1 - Tratamiento de consumos intermedios y uniformemente distribuidos (Martínez, 2002).

Simplificación de tuberías con características heterogéneas, sin consumos intermedios.

Este es el caso más habitual y más referido en la bibliografía. Enunciado de manera genérica, se trata de sustituir varias tuberías dispuestas en serie y sin consumos intermedios por una única tubería cuyo comportamiento hidráulico sea equivalente al de la serie sustituida. En general, esta equivalencia se hace en términos hidráulicos, es decir, la nueva tubería debe proporcionar las mismas pérdidas que la suma de las tuberías sustituidas:

$$\Delta h_{eq} = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (2)$$

Para modelos estratégicos, se puede optar por esta solución incluso para tramos de tubería heterogéneos, siendo en este caso necesario determinar un diámetro equivalente para la nueva línea (ver Figura 2). Esta opción es rara vez adoptada por llegarse a diámetros no comerciales y por tanto, alejados de la realidad. Ha de tenerse en cuenta que en ocasiones los resultados del modelo serán evaluados por personas ajenas a su elaboración.

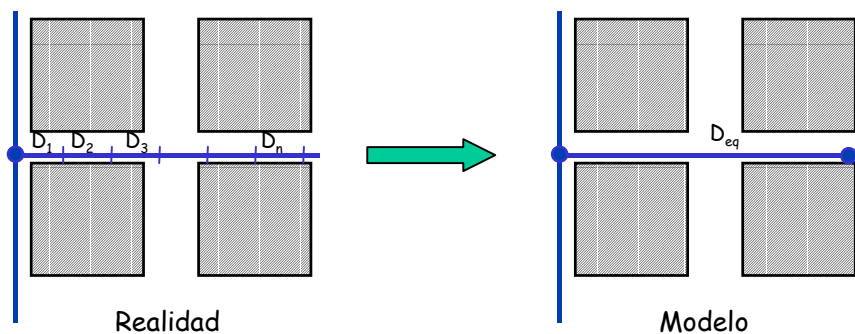


Figura 2 - Simplificación por asociación en serie de tuberías.

Si se han de agrupar n tuberías de características heterogéneas, la tubería equivalente debe provocar unas pérdidas de carga iguales a las de las tuberías asociadas. Si se utiliza la ecuación de Darcy como ecuación de pérdidas:

$$\Delta h = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} Q^2$$

$$\Delta h_{eq} = \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n \frac{8f_i L_i}{\pi^2 g D_i^5} Q_i^2 = \frac{8f_{eq} L_{eq}}{\pi^2 g D_{eq}^5} Q_{eq}^2 \quad (3)$$

Es habitual aceptar poca variación en el factor de fricción f en la ecuación anterior. Si además estamos ante el caso de ausencia de caudales intermedios, $Q_i = Q_{eq} \quad \forall i$. por tanto, la tubería equivalente tendrá una longitud y un diámetro dados por la siguiente expresión (Martínez, 2002):

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^n L_i$$

$$D_{eq} = \frac{L_{eq}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{D_i^5}} \quad (4)$$

Si se opta por el uso de la ecuación de Hazen-Williams el problema no precisa de suposiciones adicionales, como el suponer el factor de fricción invariable. En este caso, la simplificación se presenta con varias alternativas. Cesario (1995) plantea dos alternativas cuando se mantiene el coeficiente de Hazen-Williams, C_{HW} :

- Sumar las longitudes y determinar el diámetro equivalente combinando las ecuaciones (1) y (2).
- Tomar para la tubería equivalente el diámetro de alguna de las simplificadas (con el fin de trabajar con diámetros comerciales) y calcular una longitud equivalente.

Walsky et al. (2003) optan por una combinación de las anteriores, fijando el diámetro equivalente y la longitud, y dejando como grado de libertad el coeficiente de Hazen-Williams.

Sin embargo, recientes estudios (Bombardelli y García, 2004) inciden en el hecho de que los propios autores de esta ecuación (Williams y Hazen, 1920) limitan su ámbito de aplicación y advierten de la dependencia del coeficiente C_{HW} del diámetro de la conducción.

En cualquier caso, sea cual sea la opción elegida para la simplificación, la integración de ésta en un SIG requiere la definición de algún criterio adicional, como por ejemplo la homogeneidad de algunas o todas las características de las tuberías. Además, se puede incluir como criterio de simplificación un número de abonados o una determinada longitud de tubería. Por ejemplo, se puede limitar el número de abonados simplificados a fin de no desvirtuar demasiado el modelo; o fijar una longitud mínima de los tramos de tubería. De hecho, durante el cálculo de los modelos de

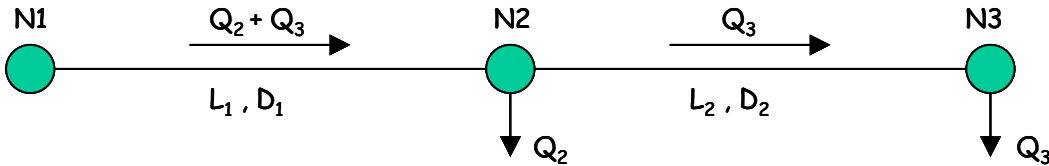
calidad, se ignora el tiempo de viaje en tuberías más cortas de una cierta longitud (Rossman et al., 1993).

Simplificación de tuberías con características heterogéneas y consumos intermedios.

Se ha comentado que existen algunos errores en los métodos de simplificación anteriores (se asume bien invariabilidad del factor de fricción, bien del coeficiente C_{HW}). En el primer caso es claramente una hipótesis cuyo objetivo es simplificar los cálculos. En el segundo se comete un error derivado del uso de la ecuación de Hazen-Williams más allá de su ámbito de aplicación. Liou (1998) estimó en un $\pm 40\%$ este error.

Por ello, a continuación se analiza una forma de calcular el diámetro equivalente de tuberías dispuestas en serie garantizando la total equivalencia hidráulica de la simplificación. Matemáticamente el planteamiento es muy sencillo. Sólo hay que obviar la hipótesis de invariabilidad del factor de fricción. Se mantiene en cualquier caso como condición adicional que la longitud equivalente ha de ser la suma de las longitudes de las tuberías sustituidas. A continuación se hace el desarrollo para dos conducciones (ver Figura 3).

Serie original



Tubería equivalente

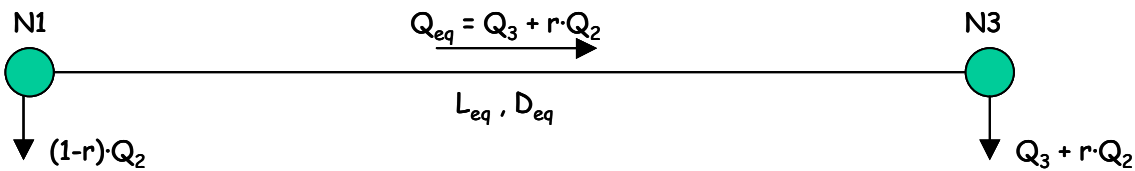


Figura 3 - Definición del problema para la equivalencia exacta.

$$\Delta h_{eq} = \Delta h_1 + \Delta h_2 = \frac{8f_1 L_1}{\pi^2 g D_1^5} (Q_2 + Q_3)^2 + \frac{8f_2 L_2}{\pi^2 g D_2^5} Q_3^2 \quad (5)$$

En este caso, como en los anteriores, debe conocerse cuánto vale la pérdida de carga total, Δh_{eq} . El problema se reduce a calcular el diámetro de debe tener una tubería por la que circula un

caudal Q_{eq} , que tiene una longitud L_{eq} y que debe provocar una pérdida de carga Δh_{eq} . Es decir, se trata de uno de los cuatro problemas básicos, que además se puede simplificar si se toma la ecuación de Swamee y Jain (1975) para el cálculo del factor de fricción:

$$f_{eq} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (6)$$

En esta ecuación, el número de Reynolds, Re , vendrá dado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{eq}}{\mu} = \frac{4\rho \cdot Q_{eq}}{\pi \mu D_{eq}} \quad (7)$$

El diámetro equivalente, puesto en función del nuevo factor de fricción, quedará:

$$\Delta h_{eq} = \frac{8f_{eq}L_{eq}}{\pi^2 g D_{eq}^5} Q_{eq}^2 \Rightarrow D_{eq} = \sqrt[5]{\frac{8f_{eq}L_{eq}}{\pi^2 g \Delta h_{eq}} Q_{eq}^2} \quad (8)$$

El proceso de resolución será iterativo, aunque de rápida convergencia según el esquema de la Figura 4.

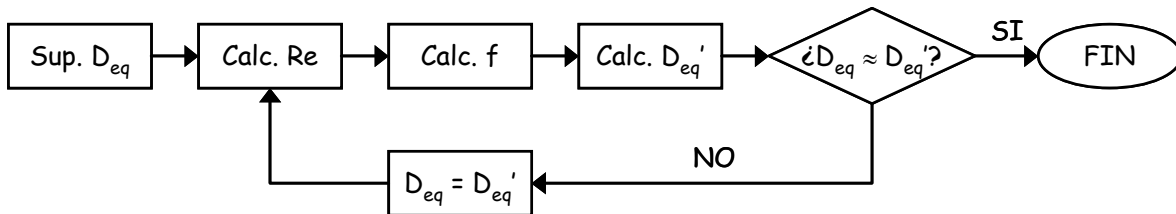


Figura 4 - Proceso iterativo para el cálculo del diámetro equivalente.

Obsérvese que para este cálculo se deja como grado de libertad el reparto de los caudales intermedios, obteniéndose por tanto tantos diámetros equivalentes como criterios de reparto se utilicen.

EVALUACIÓN DEL ERROR EN UNA RED SENCILLA

A continuación se verá cuál es el error cometido con las simplificaciones descritas anteriormente. En concreto se contrastarán las simplificaciones obtenidas por la aplicación de las ecuaciones (2) y (3), por una parte, y el método descrito para las ecuaciones (5) a (8). Se comprobarán dos tipos de errores:

- Los errores cometidos en las pérdidas de carga (que en principio era la condición que se imponía a la tubería equivalente)
- Los errores cometidos en el tiempo de recorrido, que afectan principalmente a los modelos de calidad, y que no se tuvo en cuenta en el desarrollo del método de simplificación.

Para ello, se utilizará una red similar a la de la Figura 3:

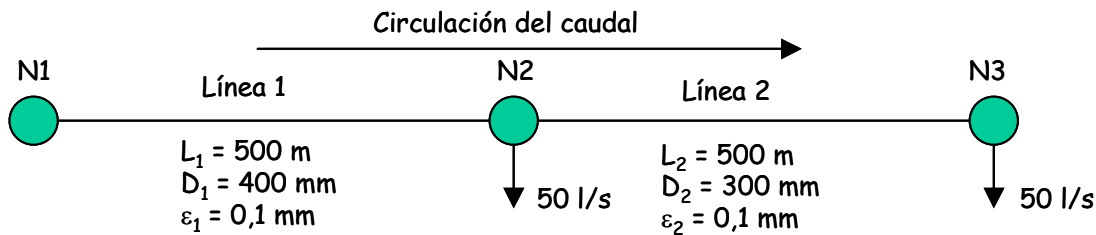


Figura 5 - Ejemplo de simplificación.

En primer lugar, calcularemos el comportamiento de la red antes de la simplificación, a fin de conocer los valores exactos de tiempo de recorrido y de pérdida de carga:

Tabla 2 - Resultados hidráulicos de la red sin simplificar.

	Q_{lin} (l/s)	v (m/s)	t_r (s)	Re	f	Δh (mca)
Línea 1	100	0,7958	628,3	$2,89 \cdot 10^5$	0,01676	0,676
Línea 2	50	0,7074	706,9	$1,93 \cdot 10^5$	0,01807	0,768
Líneas Eq.	-	-	1335,2	-	-	1,444

Evaluemos en primer lugar la simplificación admitiendo invariabilidad del factor de fricción. Se elaborará una tabla (Tabla 3) para distintos valores del coeficiente de reparto r , ya que, como se ha visto, para cada valor de éste se obtendrá un valor distinto del diámetro equivalente:

Tabla 3 - Resultados hidráulicos de la simplificación admitiendo invariabilidad de f .

Coef. Reparto				Error (%)				Error (%)
(r)	Q_{eq} (l/s)	D_{eq} (mm)	t_r (s)		f	Δh_{eq} (mca)		
0,0	50	301,55	1428,3	6,98	0,01807	1,497		3,65
0,1	55	313,27	1401,4	4,96	0,01788	1,481		2,56
0,2	60	324,36	1377,2	3,15	0,01771	1,467		1,59
0,3	65	334,91	1355,3	1,51	0,01755	1,454		0,70
0,4	70	344,99	1335,4	0,02	0,01741	1,443		-0,10
0,5	75	354,64	1317,1	-1,36	0,01728	1,432		-0,84
0,6	80	363,92	1300,2	-2,62	0,01716	1,422		-1,53
0,7	85	372,85	1284,5	-3,79	0,01705	1,413		-2,16
0,8	90	381,47	1269,9	-4,89	0,01695	1,404		-2,76
0,9	95	389,81	1256,3	-5,91	0,01685	1,396		-3,32
1,0	100	397,89	1243,4	-6,87	0,01676	1,389		-3,84

Como se observa, la hipótesis de invariabilidad del factor de fricción puede generar errores en la pérdida de carga de hasta casi el 4%. Para el caso más extendido de reparto de caudales (50% a cada extremo, es decir, $r = 0,5$) estaríamos ante un error en torno al 1% en este caso. Pero además, si se ha de utilizar este método de simplificación para un modelo destinado a la simulación de la calidad del agua, el error cometido en el tiempo de recorrido es aún mayor, llegando a valores que rozan el 10% en los casos extremos (ver Figura 6)

Si corregimos esta hipótesis y calculamos un factor de fricción equivalente, según las ecuaciones (5) a (8) llegamos a los siguientes resultados:

Tabla 4 - Resultados hidráulicos de la simplificación con corrección de f.

Coef. Reparto (r)	Q_{eq} (l/s)	D_{eq} (mm)	t_r (s)	Error (%)	f	Δh_{eq} (mca)	Error (%)
0,0	50	303,72	1449,0	8,52	0,01807	1,444	0,0
0,1	55	314,86	1415,6	6,03	0,01788	1,444	0,0
0,2	60	325,39	1385,9	3,80	0,01771	1,444	0,0
0,3	65	335,39	1359,2	1,80	0,01755	1,444	0,0
0,4	70	344,92	1334,9	-0,02	0,01741	1,444	0,0
0,5	75	354,05	1312,6	-1,69	0,01728	1,444	0,0
0,6	80	362,80	1292,2	-3,22	0,01716	1,444	0,0
0,7	85	371,22	1273,3	-4,63	0,01705	1,444	0,0
0,8	90	379,35	1255,8	-5,94	0,01695	1,404	0,0
0,9	95	387,20	1239,4	-7,17	0,01685	1,396	0,0
1,0	100	394,79	1224,1	-8,32	0,01676	1,389	0,0

Como era de esperar, en este caso el error cometido en el cálculo de la pérdida de carga es nulo. Sin embargo, se observa que el error cometido en el tiempo de recorrido es incluso mayor que en el caso anterior (ver gráfica comparativa a continuación).

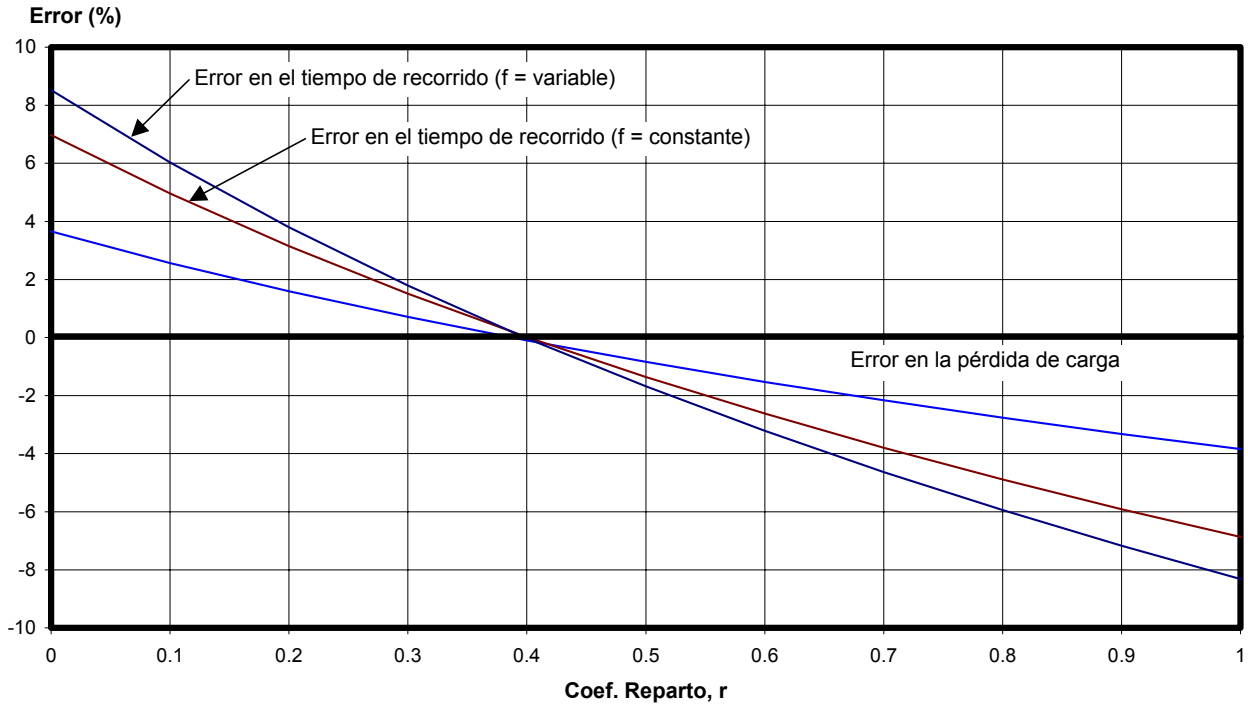


Figura 6 – Comparación de errores cometidos durante la simplificación.

MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE TUBERÍAS EQUIVALENTES EN MODELOS HIDRÁULICOS Y DE CALIDAD

A continuación se describe un método alternativo de simplificación que añadirá a la restricción de equivalencia en las pérdidas de carga de las conducciones otra restricción: igualdad en el tiempo de recorrido. Esta nueva restricción implicará sin embargo dejar un grado de libertad adicional. Éste será el coeficiente de reparto.

Las restricciones serán, para la simplificación de dos conducciones:

- Igualdad en las pérdidas de carga:

$$\Delta h_{eq} = \Delta h_1 + \Delta h_2 = \frac{8f_1 L_1}{\pi^2 g D_1^5} (Q_2 + Q_3)^2 + \frac{8f_2 L_2}{\pi^2 g D_2^5} Q_3^2 \quad (5)$$

- Igualdad en el tiempo de recorrido:

$$t_{r,eq} = t_{r,1} + t_{r,2} = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{\pi D_1^2 L_1}{4(Q_2 + Q_3)} + \frac{\pi D_2^2 L_2}{4Q_3} \quad (9)$$

Si mantenemos como restricción que la longitud equivalente sea suma de las longitudes de las tuberías simplificadas, la ecuación (9) implica fijar la velocidad de circulación en la nueva conducción:

$$t_{r,eq} = \frac{L_{eq}}{v_{eq}} \Rightarrow v_{eq} = \frac{L_{eq}}{t_{r,eq}} \quad (10)$$

Con esto podemos acometer un proceso de iteración similar al descrito en la Figura 4, cambiando el conocimiento del caudal por el de la velocidad. A partir de una estimación del diámetro equivalente, D_{eq} , podemos obtener el número de Reynolds según la ecuación (7):

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{eq} \cdot D_{eq}}{\mu}$$

A continuación, con este valor de Re y el diámetro supuesto, calculamos el factor de fricción (mediante la ecuación de Colebrook-White o la de Swamee-Jain si se desean evitar iteraciones excesivas):

$$f_{eq} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Por último, recurrimos a la ecuación de darcy para calcular el nuevo diámetro equivalente:

$$\Delta h_{eq} = f_{eq} \frac{L_{eq}}{D_{eq}} \frac{v_{eq}^2}{2g} \Rightarrow D_{eq} = f_{eq} \frac{L_{eq}}{\Delta h_{eq}} \frac{v_{eq}^2}{2g} \quad (11)$$

Una vez se ha alcanzado un valor del diámetro equivalente con el margen de error deseado, se calculará el caudal que debe circular por la línea y, por tanto, se deducirá el criterio de reparto:

$$Q_{eq} = \frac{\pi}{4} D_{eq}^2 v_{eq} \Rightarrow r = \frac{Q_{eq} - Q_3}{Q_2} \quad (12)$$

Para el ejemplo presentado en la Figura 5, los resultados obtenidos serían:

Tabla 4 - Resultados hidráulicos de la simplificación admitiendo invariabilidad de f .

Coef. Reparto							
(r)	Q_{eq} (l/s)	D_{eq} (mm)	t_r (s)	Error (%)	f	Δh_{eq} (mca)	Error (%)
0,3986	69,93	344,79	1335,2	0,00	0,01741	1,444	0,00

Tal y como se pretendía, no se produce error en ninguno de los dos apartados considerados: pérdidas de carga y tiempo de recorrido. Esto se traducirá en mayor exactitud cuando se combina un modelo hidráulico con un modelo de calidad.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han puesto de manifiesto los errores que se cometen cuando se procede a la simplificación de tuberías mediante asociación de series. Se comprobado que los métodos que asumen coeficientes de rugosidad constantes (sea en la ecuación de Hazen-Williams, sea en la ecuación de Darcy) producen errores que pueden llegar a ser importantes. Se ha planteado también la resolución de equivalencia hidráulica exacta utilizando la ecuación de Darcy y el factor de fricción de Colebrook-White, utilizando la aproximación explícita de Swamee y Jain (1976).

Sin embargo, se ha demostrado también que si el modelo hidráulico se utiliza como punto de partida para un análisis de calidad del agua, éste tiene errores de partida en cuanto a los tiempos de permanencia del agua en la red que rondan el 8%.

Finalmente, se ha presentado un método de simplificación de series de tuberías con dos restricciones (pérdidas de carga y tiempo de recorrido) que da resultados exactos siempre que el sentido de circulación del flujo sea conocido. Se ha presentado el método para la asociación de dos tuberías, pero es fácilmente extrapolable a la asociación de cualquier número de tuberías, sin ramificaciones intermedias. Los resultados obtenidos son un diámetro equivalente y un reparto de cargas para los caudales de los nudos intermedios eliminados.

Este método es especialmente adecuado para la realización de modelos desde un Sistema de Información Geográfica, pues en éste se dispone de antemano de las cargas (caudales) del modelo. Los datos de caudal, junto con los datos propios de las tuberías, son datos indispensables para la simplificación.

El trabajo se ha completado con la aplicación a un ejemplo numérico sencillo.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, quién ha financiado el proyecto de investigación nº DPI2003-02676, titulado *MAGIAS: Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOMBARDALLI, F.A. y GARCÍA, M.H. (2003). *Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, N°11, Noviembre 2003, pp. 839-846.
- CESARIO, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. Ed. AWWA. Denver, EE.UU.
- LÓPEZ PATIÑO, G.; MARTÍNEZ SOLANO, F.J.; IGLESIAS REY, P.L.; IZQUIERDO SEBASTIÁN, J. (2003). *Modelación de redes de distribución de agua*. Capítulo 12 de “Ingeniería Hidráulica en los Abastecimientos de Agua”, Ed. GMMF, Univ. Politécnica de Valencia, España.
- LIU, C.P. (1998). *Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, N°9, Septiembre 1998, pp. 951-954.
- MARTÍNEZ SOLANO, F.J. (2002). *Aplicación de los sistemas de información geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable*. Tesis Doctoral. Dept. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Octubre 2002.
- PÉREZ GARCÍA, R. (1993). *Dimensionado Optimo de Redes de Distribución de Agua Ramificadas considerando los Elementos de Regulación*. Tesis Doctoral. Dept. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- ROSSMAN, L.A. (1993). *EPANET 1.0 User Manual*. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, EE.UU.
(<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>)
- ROSSMAN, L.A. (2000). *EPANET 2 Programmer's ToolKit*. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, EE.UU.
(<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html#Toolkit>)
- SWAMEE, P.K. y JAIN, A.K. (1976). *Explicit equations for pipe flow problems*. Journal of Hydraulics Division ASCE, Vol. 102, N°5, pp. 657-664.
- WALSKY ET AL. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Ed. Haestad Methods, Inc. EE.UU.
- WILLIAMS, G.S. y HAZEN, A. (1920). *Hydraulic tables*. Ed. Wiley, Nueva York, EE.UU.