

Resumen

La mejora del aprovechamiento del agua en los sistemas de Abastecimiento exige un control de las medidas de caudal, para contabilizar los volúmenes distribuidos y las pérdidas de agua. Por tanto, se plantea como detectar y corregir los errores de medida sin recurrir a costosas y, a veces prácticamente imposibles, contrastaciones de medida "in situ"

En este artículo se aplica un método de estimación de caudal a una Red de Abastecimiento de agua, indicando la compensación realizada a dichas medidas, atendiendo a una máxima probabilidad respecto a las precisiones asignadas a los distintos medidores.

Palabras clave:

Agua potable, Red distribución, Medida caudal, Estudio estadístico.

Abstract

Flow measurement quality control in a private water supply system.

Improving the use made of water in supply systems requires flow measurement monitoring to keep of the volume distributed and the amount lost. This poses the question of how to detect and correct measurement errors without resort to expensive, or practically impossible, on site measurement checks.

This article describes a method for estimating flow in a water supply network, outlining how such measurements are compensated for in view of maximum probability ratings assigned to the different measuring devices.

Keywords:

Drinking water, Distribution network, Flow measurement, Statistical study.

Control de calidad de medidas de caudal en un abastecimiento de agua privado

Por: **Alberto Menéndez Martínez**, Dr. Ing. Industrial y Dr. Ing. Automático, Prof. Dpto. de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla.

c/ Virgen de Africa, 7, 41011 Sevilla. Tel. 95 455 28 38 - Fax: 95 455 28 33

Félix Biscarri Triviño, Licenciado en Ciencias Físicas,

Investigador Dpto. de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla.

Alvaro Ariel Gómez Gutiérrez, Ingeniero Técnico Industrial.

Colaborador del Dpto. de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla.

1. Introducción

Prender conocer los caudales circulantes en una Red de Abastecimiento conlleva un conjunto de escollos que a veces no es fácil superar. Suponiendo que existan los suficientes medidores para darnos la información requerida, éstos tienen distintos principios de funcionamiento (caudalímetros electromagnéticos, por ultrasonidos, contadores de diversas tecnologías, niveles,...), con caudales nominales diversos y con distintos niveles de incertidumbre.

Todo ello viene además notablemente agravado por la dificultad

práctica de retirar los medidores de la Red y llevarlos a un laboratorio para su verificación [4] [5].

Resultado de todo ello son unas medidas de caudal con un error difícil de predecir. Dichas medidas hacen que los balances no cuadren exactamente (el caudal de agua que entra en un nudo no es igual al que sale de él) y que no sepamos a que medidor achacar el error.

Este artículo aborda el mencionado problema y en él se presenta una aplicación real del método de estimación FLOS (Flux Optimal Estimator) anteriormente presentado en [2]. Con la colaboración del

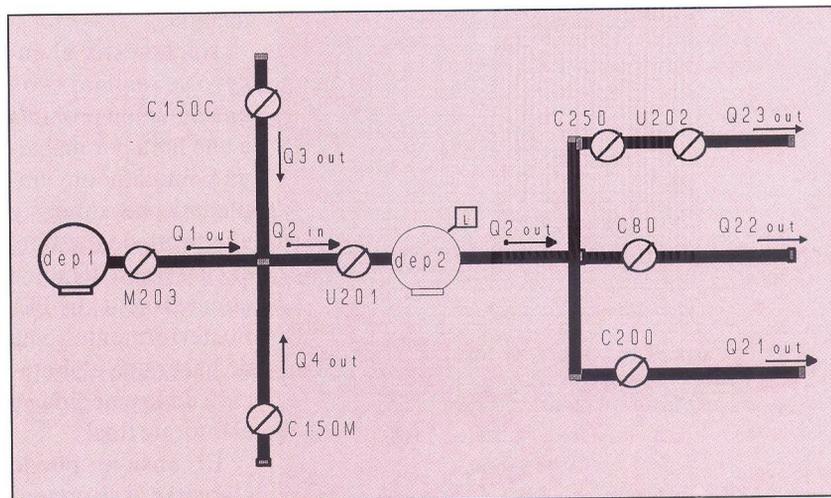


Figura 1.- Topología de la Red de Mairena-El Patriarca.

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
dep 1	depósito MAIRENA	C80	contador
dep 2	dep. EL PATRIARCA.	C200	contador
C250	contador	L	medida de nivel
U201	caudalím. Electromagnético	M203	caudalím. por Ultrasonidos
U202	caudalím. por Ultrasonidos.	Qi	caudal i
C150C	contador	C150M	contador.

Cuadro 1.

Departamento de Instrumentación de EMASESA (Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Agua de Sevilla) se ha aplicado dicho método a la Red de Abastecimiento de MAIRENA-EL PATRIARCA de la mencionada empresa EMASESA.

2. Descripción de la red de Mairena-El Patriarca

2.1. Topología de la Red

La topología de la Red de Abastecimiento que analizamos se muestra en la **Figura 1**.

Los elementos representados en la **Fig. 1** se detallan en la lista de símbolos véase **Cuadro 1**.

2.2. Ecuaciones de balance de la Red

Por la descripción física de la Red, los valores estimados de los flujos de agua deben cumplir:

$$1) \quad Q2^{in} = Q1^{out} + Q3^{out} + Q4^{out} \quad (\text{ec. 1})$$

$$2) \quad Q2^{out} = Q21^{out} + Q22^{out} + Q23^{out} \quad (\text{ec. 2})$$

Ecuación de balance del depósito 2:

$$3) \quad (A2 \times \Delta L2) / \Delta t = Q2^{in} - Q2^{out} \quad (\text{ec. 3})$$

Ecuaciones de nudo:

donde

Δt es el intervalo temporal de medida.

A2 es la constante del depósito 2, que indica cuantos m³ almacena el depósito cuando sube su nivel 1 cm. (medida en m³/cm.)

$\Delta L2$ es la variación de nivel del depósito en el tiempo Δt .

Nota: Los caudales circulantes se miden durante un determinado período temporal, convirtiendo dichas medidas en volúmenes. En lo que sigue se hablará indistintamente de volúmenes acumulados o caudales.

Se ha previsto

una

“Incertidumbre

Asignada”

2.3. Descripción de los medidores

En la **Tabla 1** se presentan los rangos de medida y las “Incertidum-

Tabla 1			
Descripción de medidores			
	Rango de medida	Incertidumbre asignada	
		% del valor medido	% del fondo de escala
C80	hasta 120 m ³ /h.	2,8 %	—
C150C	hasta 270 m ³ /h.	10,8 %	—
C150M	hasta 270 m ³ /h.	8,2 %	—
C200	hasta 200 m ³ /h.	5,6 %	—
C250	hasta 1200 m ³ /h.	4,8 %	—
U201	hasta 100 litros/seg.	1 %	1 %
U202	hasta 200 litros/seg.	0,75 %	0,75 %
M203	hasta 100 litros/seg.	1,25 %	1,25 %
L	0 a 3 metros	1 %	—

bres Asignadas” de los medidores de la Red. Según los tipos de medidores, se ha previsto una “Incertidumbre Asignada” que puede descomponerse en dos componentes: % del valor medido y % del fondo de escala. Los datos sobre “Incertidumbre Asignada” se han deducido de la información de precisión de medida dada por el fabricante, a la cual se ha añadido una incertidumbre de envejecimiento que hemos estimado en 0.2% por semestre para los contadores y en 0.1% por año para el resto de caudalímetros electrónicos (en % del valor medido). Esta caracterización de envejecimiento de los medidores es una

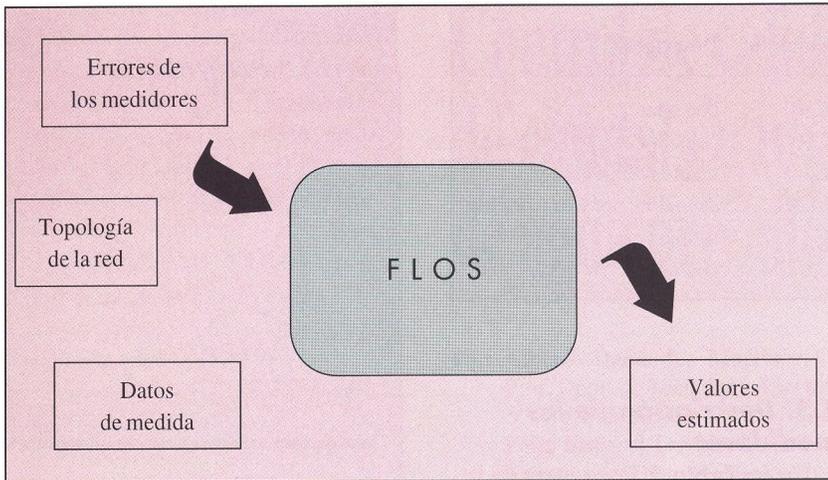


Fig. 2. Esquema del proceso.

aproximación deducida de datos provenientes de distintas fuentes, entre los que cabe citar los del “Laboratoire des Compteurs d’Eau de la Ville de Paris”.

3. Estimación de medidas de caudal del abastecimiento de Mairena-El Patriarca

3.1. Descripción del método

La estimación de medidas es el proceso de asignar el valor “más probable” al conjunto de variables de estado desconocidas (en nuestro caso, los caudales de la Red) de acuerdo a un criterio estadístico determinado. En este trabajo se minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias ponderadas entre los valores medidos y los valores estimados de los caudales. Dicha ponderación consiste en asignar a las medidas de caudal de los medidores con menor error asociado una mayor probabilidad de que sean ciertas.

A partir de este criterio estadístico, el proceso de estimación de caudales FLOS (ver **Figura 2**) utiliza las medidas de caudal o volumen proporcionadas por los distintos medidores (se analizan los caudales circulantes durante un tiempo determinado, o sea, los volúmenes de agua que ha intercambiado la Red durante ese tiempo) junto con sus valores previstos de incertidumbre correspondiente a cada medidor y

junto con la información de la topología de la Red, para que los valores estimados verifiquen las ecuaciones de balance de la Red de Abastecimiento

3.2. Variables de estado y topología de la Red

Siguiendo los desarrollos ya expuestos en [2], podemos establecer una relación entre los 6 elementos del vector X (variables de estado del sistema) y el conjunto de medidas disponibles de la Red (vector Q_{medido}) mediante la matriz de transferencia H, que recoge las ecuaciones de balance. Esta sería:

$$Q_{medido} = H \times X \quad (e. 4)$$

siendo:

$$Q_{medido} = \begin{bmatrix} Q1_{out} \\ Q3_{out} \\ Q4_{out} \\ Q2_{in} \\ A2_{in} \\ Q21_{out} \\ Q22_{out} \\ Q23_{out} \\ Q231_{out} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} Q2_{out} \\ Q3_{out} \\ Q4_{out} \\ Q22_{out} \\ Q23_{out} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las variables de estado son el conjunto mínimo de medidas que precisamos para definir por completo la Red. Conociendo los 6 flujos que componen el vector X y las ecuaciones de balance de la Red tenemos perfectamente definido el sistema, pues sabemos el flujo de agua en todo punto.

3.3. Resolución Matricial

La expresión para la estimación de mínimos cuadrados ponderados [2] se reproduce aquí:

$$X_{estimado} = [(H)^T \times [R^{-1}] \times H]^{-1} \times [H]^T \times [R^{-1}] \times Q_{medido}$$

$X_{estimado}$ es el vector de variables de estado estimadas, de donde obtenemos el vector de medidas estimadas;

$$Q_{estimado} = H \times X_{estimado}$$

3.5. Incertidumbre de Medidas

En la e.5, [R] es una matriz diagonal [9x9], cuyos elementos son las varianzas correspondientes a la incertidumbre de los medidores que nos proporciona las medidas recogidas en el vector Q_{medido} , siendo

$$R11 = \sigma^2_{U203}, R22 = \sigma^2_{C150C}, R33 = \sigma^2_{C150M} ; \dots ; R99 = \sigma^2_{U202}$$

La varianza es igual al cuadrado de la desviación estándar (σ), que puede calcularse en primera aproximación [5], admitiendo una distribución de Gaus y tomando 22 valores de muestra, dividiendo la incertidumbre de la medida entre la cantidad 2,13.

En la **Tabla 2** presentamos las medidas correspondientes a los vo-

Tabla 2

Volúmenes medidos en 24 horas, incertidumbres y estimaciones

1/6/95	medidor C250 (m³)	medidor C200 (m³)	medidor C80 (m³)	medidor C150C (m³)	medidor C150M (m³)	medidor M203 (m³)	medidor U201 (m³)	medidor U202 (m³)	medidor DEP.2 (m³)
Valor Medido: Q _{medido}	3290	550	94	300	480	2821	3930	2880	3.68
Valor Estimado: Q _{estimado}	3114	553	94	307	491	2968	3766	3114	4,60
Incertidumbre Estimada: Q _{estimado} - Q _{medido}	-176	+3	0	+7	+11	+147	-164	+234	+0,92
Incertidumbre Asignada al Medido (según Tabla1)	±158	±30,8	±2,6	±32,4	±39,4	±143,3	±125,7	±151,2	±17,28
Valor Medio de las Incertidumbres Estimadas en un mes (Figura 4)	-230,7	-0,016	+0,003	+6,88	+11,15	+145,73	--124,28	+173,14	+0,30
	-7,41%	+0,003%	+0,003%	+2,24%	+2,27%	+4,91%	-3,3%	+5,56%	+6,65%

lúmenes (m³) que han circulado durante un día por los 9 medidores junto con el valor de incertidumbre prevista (también en m³) calculada para cada medida. La incertidumbre prevista de las medidas de los caudalímetros y contadores se han calculado aplicando a cada una los porcentajes de error sobre plena escala y sobre medida actual descritos en el apartado "Descripción de los Medidores".

La incertidumbre sobre el volumen acumulado en el depósito (DEP.2) precisa una aclaración. El 1% de error asignado se refiere a la medida del nivel, en cm. El caudal intercambiado entre el depósito y la Red durante un día será:

$$Q2 = A2 \times \Delta L2(\text{diario}) \quad (\text{ec. 7})$$

La componente de error asociada a Q2 se obtiene:

$$E_{Q2} = A2 \times E_{\Delta L2} \quad (\text{ec. 8})$$

donde:

$$E_{\Delta L2} = E_{L2(\text{día D})} + E_{L2(\text{día D+1})} \quad (\text{ec. 9})$$

(hemos considerado que el error de la constante del depósito es despreciable, E_{A2}=0)

3.5 Aplicación al conjunto de medidas

Partimos de los volúmenes de agua (en m³) que han pasado por los 9 medidores durante un período de prueba de aprox. un mes (en la **Tabla 2** se presentan los valores de uno de estos días).

Para cada uno de estos días y para cada medidor calculamos su medida estimada según la e. 5 y la e. 6 anteriores.

4. Presentación de resultados

En las **Figuras 3 y 4** se presentan los resultados obtenidos mediante este proceso (FLOS) de estimación. Por simplificar la presentación de datos nos limitamos a exponer solamente los gráficos de los caudales principales: caudalímetros M203 y U201.

En la **Figura 3** se presentan los valores medidos y estimados diarios, junto con la banda de incertidumbre esperada, el error en tanto

por ciento en base a la medida estimada y la distribución de frecuencia de dichos errores, experimental y gaussiana.

Los gráficos de control nos informan si las muestras tomadas (en grupos de dos) se engloban en una población normal y si el rango de cada grupo está en la banda permitida. Los indicadores estadísticos Chi-square y P-value valoran la bondad de la aproximación gaussiana. (Cuanto mayor sea el indicador P-value, mayor es la consistencia de la muestra, aconsejando su rechazo si es menor de 0.05. Cuanto menor sea el Chi-square, mejor es la muestra considerada).[1]

Mediante dichos gráficos de control (**Figura 3**) se deduce la recomendación de rechazar las medidas tercera y cuarta de los datos registrados (correspondientes al 2º punto del gráfico de control). Estos datos se consideran anómalos. Se eliminan de la muestra y se rehace el proceso FLOS sobre las restantes 24 - 2 = 22 medidas. Se obtienen así los resultados expuestos en la **Figura 4**, en cuyos gráficos de control se com-

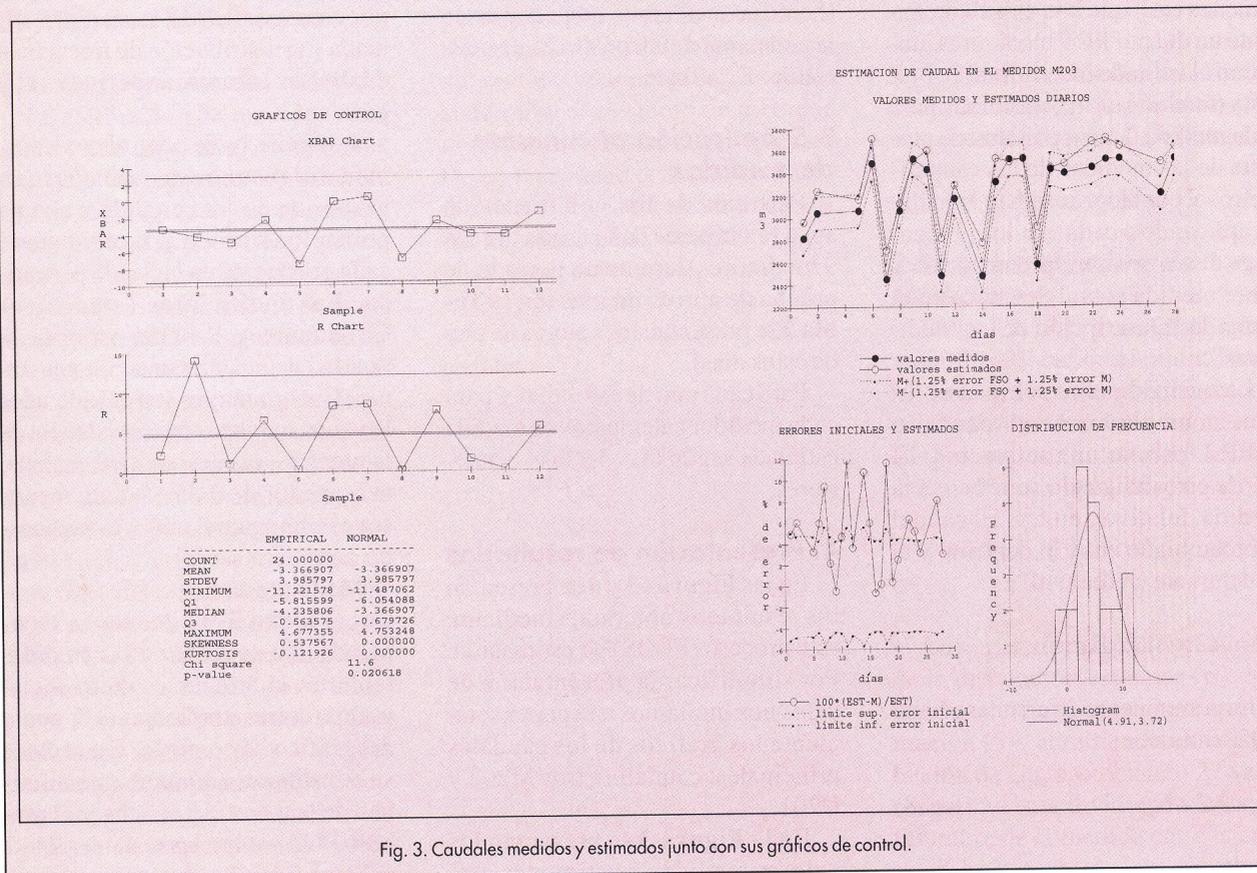
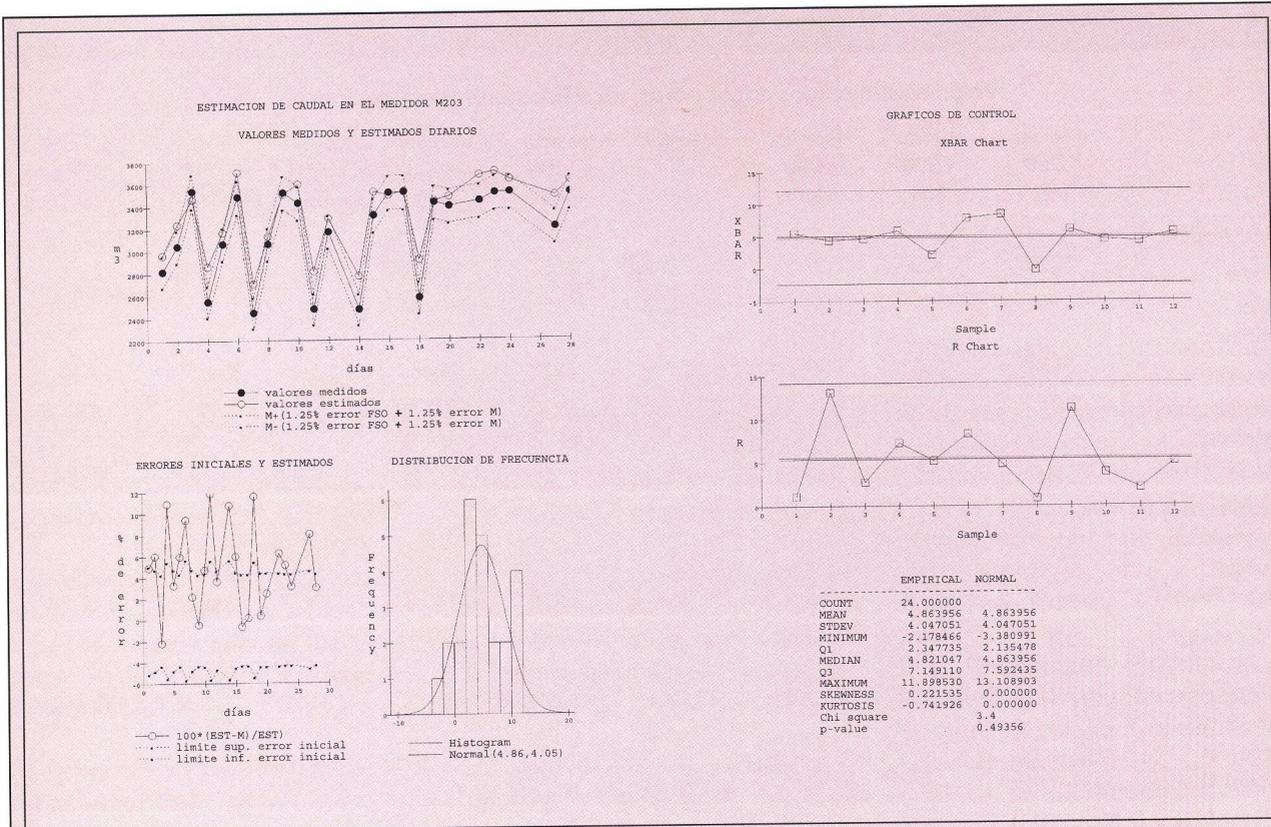


Fig. 3. Caudales medidos y estimados junto con sus gráficos de control.

prueba que todas las medidas son aceptadas como válidas.

De los valores medidos y estimados de dicha **Figura 4** se han toma-

do los datos completos de un día, presentándose estos en la **Tabla 2**.

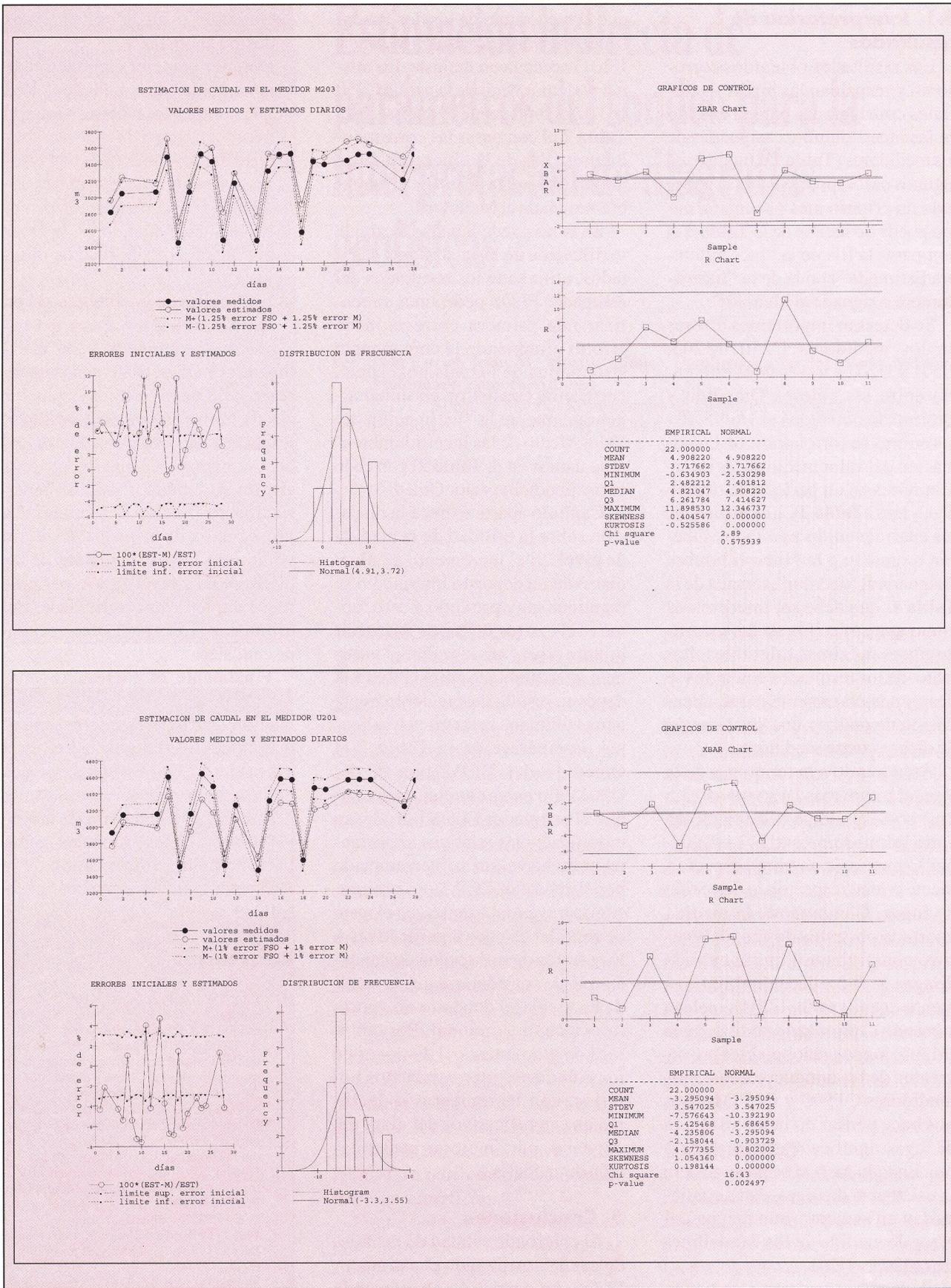


Fig. 4. Caudales medidos y estimado, tras la eliminación de valores anómalos, junto con sus gráficos de control.

4.1. Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos corroboran y respaldan las hipótesis iniciales consideradas para el cálculo de las incertidumbres asignadas de los medidores (**Tabla 1**). Incluso, en algunos casos, podría haberse adoptado un criterio más pesimista, como puede deducirse de la **Tabla 2** al comparar la fila de la “Incertidumbre Estimada” con la de la “Incertidumbre Asignada al Medidor”.

Se detectan importantes errores en los medidores C250, M203, U201 y U202 a través de la diferencia entre los valores Q_{medido} y Q_{estimado} obtenidos el 1/6/95. Estos errores se corroboran con la estimación del valor medio de las incertidumbres en un período de tiempo de un mes (**Tabla 2**). Los errores de los cuatro medidores citados superan o igualan a la “Incertidumbre Asignada al Medidor”, tomada de la **Tabla 1**, que debe ser interpretada como una acotación de las incertidumbres máximas tolerables. Por tanto, de los resultados obtenidos se desprende claramente la recomendación de realizar una verificación de dichos cuatro medidores.

Atendiendo a la topología de la Red, el tramo más largo (unos 12,5 km) corresponde a la conducción entre los medidores M203 y U201, por lo que sería un tramo especialmente crítico respecto a la detección de fugas. Comparando la medida aportada por estos dos caudalímetros, comprobamos que la entrada de agua en la conducción (M203) es menor que la salida (U201), incluso sumando al principal aporte de agua (M203) los pequeños aportes provenientes de las conducciones de los medidores C150C y C150M. Esto nos hace pensar en la inexistencia de fugas significativas en dicho tramo. En todo caso, si se presupusiera la existencia de fugas, éstas conllevarían un aumento, aún mayor, del error de medida de los caudalímetros M203 y U201.

Podemos considerar, atendiendo de nuevo a la topología de la Red,

que al menos uno de los dos caudalímetros considerados (M203 y U201) necesita un reajuste. Lo mismo podemos decir de la pareja C250 y U202, como puede deducirse de la **Tabla 2** al comparar las correspondientes filas de la “Incertidumbre Estimada” con la de la “Incertidumbre Asignada al Medidor”.

En tanto pueda llevarse a cabo la verificación de los medidores ya citados, utilizando los resultados del estimador FLOS podríamos ya realizar una primera corrección de errores eliminando la componente sistemática de los mismos. Dicha corrección consistiría en sumar algebraicamente la “Estimación del Valor Medio de las Incertidumbres” (que damos en la **Tabla 2**) con cada correspondiente valor Q_{medido} .

Capítulo aparte merece la discusión sobre la utilidad de la medida de nivel. Si el incremento de nivel diario de un depósito intermedio se mantiene muy próximo a cero, como es el caso de la Red de Abastecimiento aquí considerada, el volumen intercambiado entre la Red y el depósito resulta despreciable frente a los volúmenes entrantes y salientes (compárese en la **Tabla 2** el Q_{medido} del DEP.2 con el del U201). En estas condiciones, aunque el estimador FLOS introduzca modificaciones relativas importantes en dicho volumen intercambiado por el depósito (DEP.2), su repercusión, a través del balance, en el resto de medidas es poco significativa. A los efectos de estimación de caudales, puede considerarse que la medida de nivel del depósito no aporta información adicional. Por tanto, será de gran interés el disponer de los volúmenes intercambiados horarios, con incrementos o decrementos significativos del nivel del depósito, para mejorar la estimación de caudales.

5. Conclusiones

El control de calidad de medidas de caudal, utilizando el estimador FLOS, ha permitido obtener toda una serie de resultados;

- Eliminar las medidas declaradas de tipo anómalo.
- Obtener la mejor estimación de las medidas de caudal de la Red que cumplan el balance volumétrico.
- Detectar los medidores con errores por encima de los límites admisibles. Recomendación de verificación de medidores, ordenados según probabilidad de desajuste.
- Indicación de posibles fugas en la Red.

Además, como se ha visto, el estimador FLOS permite una primera corrección de los errores sistemáticos de los medidores. No obstante, respecto a los errores residuales, deberá considerarse que los propios errores sistemáticos sufren una variación en función del caudal. La prosecución de estos estudios con volúmenes horarios, además de los diarios aquí considerados, permitirían completar las posibilidades del estimador FLOS para la corrección de caudales.

Finalmente, es interesante señalar que para obtener la mejor estimación de caudales interesa introducir todos los flujos de la Red en el estimador FLOS. En efecto, hemos podido comprobar que en aplicaciones de FLOS a una parte de la Red [3] los resultados estimados engloban una menor información de la Red y por tanto no alcanzan toda la calidad posible.

Referencias

- [1] James W. Dally & others. (1993) “Instrumentation for Engineering Measurements”, Ed. John Wiley & Sons.
- [2] A. Menéndez, F. Biscarri. (1995) “Medidas de Caudal en una Red de Abastecimiento de Agua”, Rev. Tecnología del Agua, nº 140, mes de junio, pág. 19-24.
- [3] Alvaro Ariel Gómez (1996), “Control de Calidad de un Caudalímetro Electromagnético”, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla.
- [4] Norma ISO 4064, “Measurement of Water Flow in Closed Circuits- Meters Cold Potable Water”.
Part 1 (1977): Specification.
Part 2 (1978): Installation Requirements.
Part 3 (1983): Test Methods and Equipment.
- [5] Norma ISO 5168 (1978), “Measurement of Fluid Flow -Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement”.