



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Auditoría energética en una red de distribución de agua

TESINA DEL MÁSTER

Presentado por:

D. Miguel Ángel Pardo Picazo

Tutores:

D. Enrique Cabrera Marcet

D. Ricardo Cobacho Jordán

Valencia, Diciembre de 2008

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
3	INTEGRACIÓN EN PERIODO EXTENDIDO DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA	10
3.1	ENERGÍA ENTRANTE EN LA RED, APORTADA POR EL EMBALSE	11
3.2	ENERGÍA ENTRANTE EN LA RED, APORTADA POR EL EQUIPO DE BOMBEO (ENERGÍA DE EJE).....	11
3.3	ENERGÍA ENTREGADA A LOS USUARIOS EN LOS NUDOS DE CONSUMO	12
3.4	ENERGÍA SALIENTE DE LA RED, A TRAVÉS DE LAS FUGAS EXISTENTES	12
3.5	ENERGÍA DISIPADA EN LA FRICCIÓN DEL AGUA CON LAS TUBERÍAS	12
3.6	TÉRMINO ENERGÉTICO DE COMPENSACIÓN DEL DEPÓSITO DE COLA.....	13
4	AUDITORÍA GLOBAL DE ENERGÍAS.....	14
5	INDICADORES ENERGÉTICOS BÁSICOS.....	15
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	15
5.2	EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA RED.....	16
5.3	POTENCIAL DE MEJORA MEDIANTE LA REGULACIÓN DE LA PRESIÓN	17
6	ENERGÍA ASOCIADA A LAS FUGAS EXISTENTES DE UNA RED	18
7	EJEMPLO NUMÉRICO.....	19
7.1	PLANTEAMIENTO DEL CASO	19
7.2	SIMULACIÓN A CORTO PLAZO.....	22
7.3	SIMULACIÓN A LARGO PLAZO.....	24
7.4	SENSIBILIDAD DE LOS INDICADORES ANTE CONDICIONES ALTERNATIVAS DEL SISTEMA	25
8	CONCLUSIONES	27
9	REFERENCIAS.....	28
10	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. INVERSIONES EN I+D EN LOS PAÍSES IEA (IEA, 2008)	1
FIGURA 2. PRECIO DEL PETRÓLEO EN \$ 2007 (WWW.INFLATIONDATA.COM)	2
FIGURA 3. ETAPAS DEL CICLO DEL AGUA Y ENERGIA NECESARIA PARA CADA UNA DE ELLAS (CEC, 2005)	2
FIGURA 4. TÉRMINOS QUE INTERVIENEN EN LA AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA RED	6
FIGURA 5. NOTACIÓN UTILIZADA PARA LOS NUDOS Y LÍNEAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	10
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DE LA RED SOMETIDA A ESTUDIO	20
FIGURA 7. CURVA DE MODULACIÓN DIARIA EN LA RED SOMETIDA A ESTUDIO.	21
FIGURA 8. CAUDAL APORTADO POR EL EMBALSE EN EL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN	22
FIGURA 9. NIVEL EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DURANTE EL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN	23
FIGURA 10. CAUDAL CONSUMIDO Y FUGADO A LO LARGO DEL DIA.	23

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. NOTACIÓN EMPLEADA EN LA DEFINICIÓN DE LAS ENERGÍAS ACTUANTES EN EL SISTEMA	10
TABLA 2. ESQUEMA DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA EN EL LARGO PLAZO EN UNA RED .	14
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LOS NUDOS Y LÍNEAS DE LA RED.	20
TABLA 4. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA HÍDRICA DE UN DÍA MEDIO DE SIMULACIÓN (M ³).	22
TABLA 5. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICO DEL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN (KWH/DIA)	24
TABLA 6. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA HÍDRICA ANUAL (HM ³).	24
TABLA 7. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL (MWH/AÑO).	24
TABLA 8. VALOR NUMÉRICO DE LOS INDICADORES PROPUESTOS.	25
TABLA 9. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL ALTERNATIVA 1 (MWH/AÑO).	26
TABLA 10. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL ALTERNATIVA 2 (MWH/AÑO).	26
TABLA 11. VALOR NUMÉRICO DEL INDICADOR TRADICIONAL (KWH/M ³).	26

ABSTRACT

La gestión sostenible del agua requiere grandes cantidades de energía que conviene, cuanto menos, evaluar para a partir del análisis efectuado conocer qué acción coste/beneficio es desde esta óptica la que más conviene. Y ello porque sólo de este modo se dará adecuada respuesta a las periódicas crisis de energía que en las últimas décadas se vienen sucediendo. En particular, la última ha aproximado el precio del barril de petróleo a los 150 USA dólares. También la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la única estrategia válida para hacer frente al cambio climático, aconseja reducir tanto cuanto sea posible la factura energética.

A partir de la ecuación integral de la energía y de su integración en periodo extendido, se lleva a cabo la auditoría energética de una red de distribución de agua a presión. Se evidencia que la energía entrante es igual a la saliente (la entregada a los usuarios y la perdida en fugas) más la disipada por el rozamiento. Finalmente, a partir de los precedentes términos energéticos, se definen unos indicadores que permiten valorar tanto las características energéticas del sistema como las posibilidades de mejora que permite. La auditoria energética que se presenta exige haber realizado previamente la auditoria hídrica y disponer del modelo matemático y permite cuantificar la relación agua energía en el proceso de distribución del agua. El software utilizado es EPANET 2.0.

Palabras Clave: Relación agua – energía, auditoria energética, modelación energética, eficiencia energética.

1 INTRODUCCIÓN

Que el interés por optimizar el uso de la energía es proporcional a su precio lo evidencia la correlación que existe entre las evoluciones temporales del gasto en I+D en los países de la International Energy Agency, IEA, en este área (Figura 1) y del precio del barril de petróleo (Figura 2). La comparación de las Figuras 1 y 2, bien que referidas a dólares de años distintos y a periodos de tiempo diferentes, así lo demuestra. Con todo, principio de acción y reacción, se aprecia un ligero retraso del gasto en I+D con relación al precio del crudo. Las gráficas muestran con claridad la crisis de 1973 y dejan en el aire el desenlace de la actual cuyo final, obviamente, aún se desconoce. Y ello porque a las innegables consecuencias derivadas del encarecimiento del precio del petróleo hay que añadir un nuevo factor antaño inexistente, la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

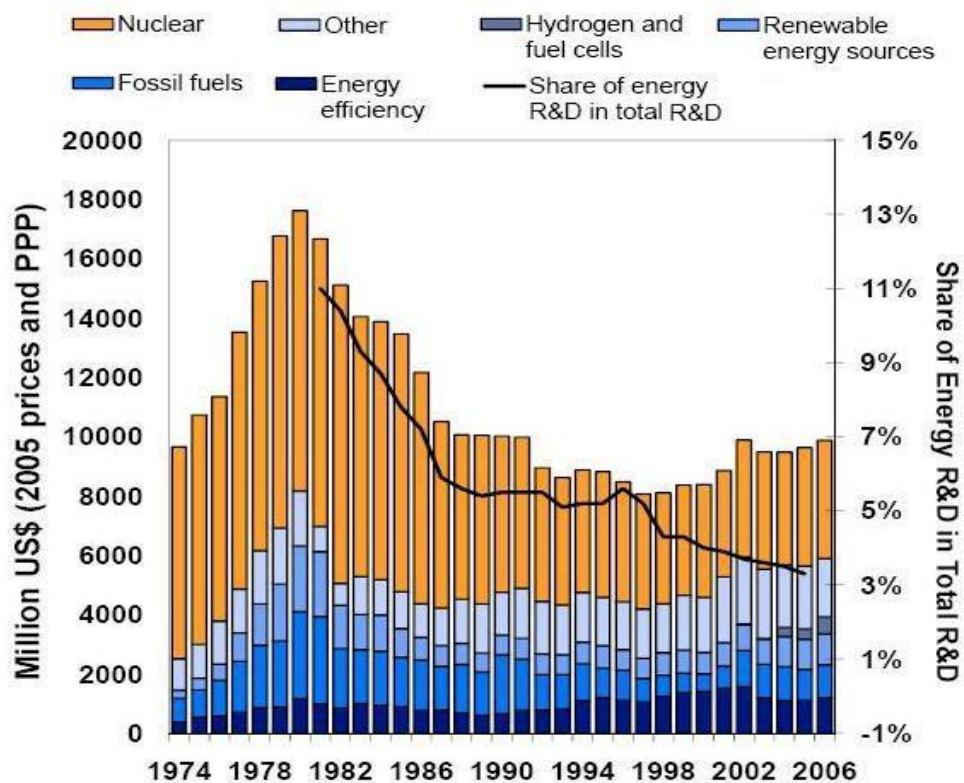


FIGURA 1. INVERSIONES EN I+D EN LOS PAÍSES IEA (IEA, 2008)

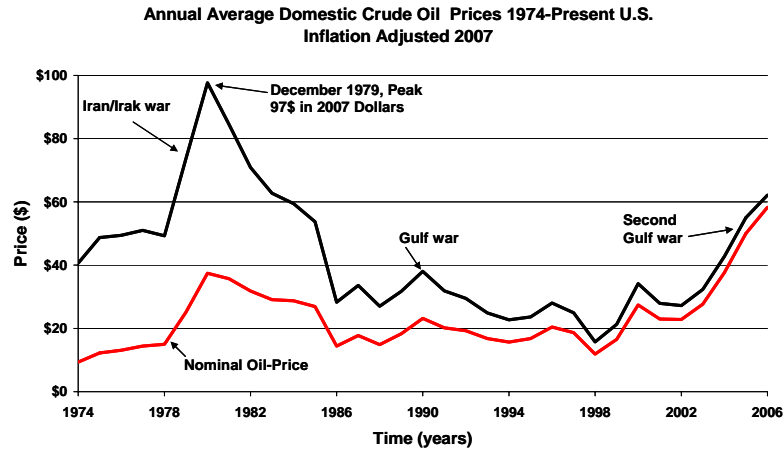


FIGURA 2. PRECIO DEL PETRÓLEO EN \$ 2007 (WWW.INFLATIONDATA.COM)

En este incierto y complejo marco energético crece la necesidad de utilizar de modo eficiente y sostenible otro recurso natural clave, el agua. Y ello exige un gasto energético importante. Así lo evidencia un estudio realizado en California hace escasos años (CEC, 2005) y cuyo resultado más notable, Figura 3, es la determinación de la horquilla correspondiente al gasto de energía unitario asociado a cada una de las etapas del ciclo del agua (en kWh/m³).

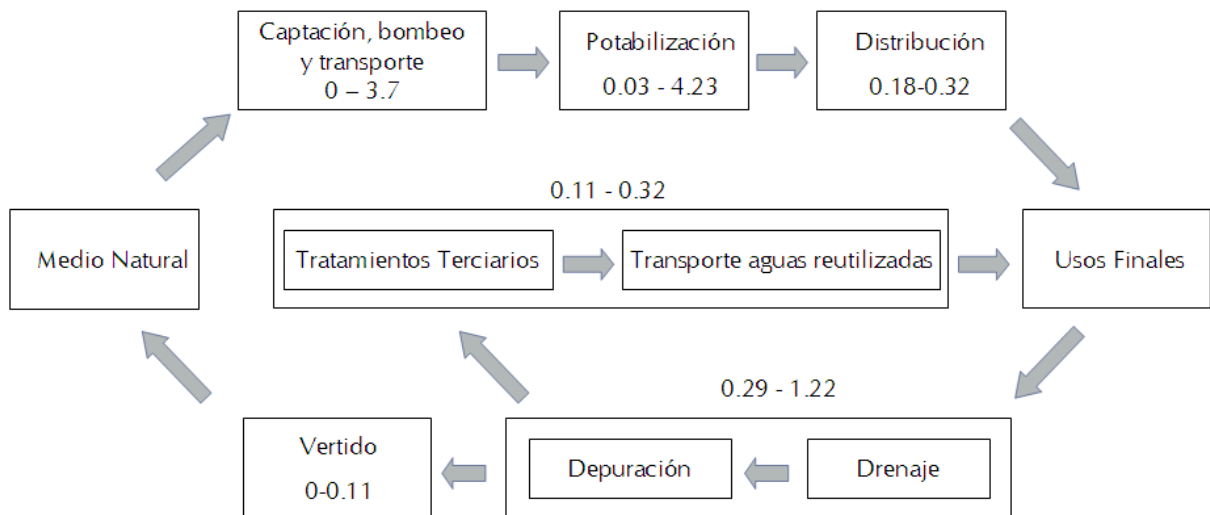


FIGURA 3. ETAPAS DEL CICLO DEL AGUA Y ENERGÍA NECESARIA PARA CADA UNA DE ELLAS (CEC, 2005)

Pero el estudio precedente va más allá del establecimiento de los consumos energéticos unitarios en cada una de las etapas del ciclo integral del agua. Asimismo analiza el

consumo total de energía relacionado con el agua. Y la conclusión es sorprendente. Representa más de un 19% del consumo global, toda vez que del total de 250 GWh/año, hasta 48 GWh/año están ligados al manejo del agua. No extraña, pues, que hasta el mismo Congreso de los USA se haya interesado por este asunto encargando al Departamento de Energía un estudio sobre la relación entre los dos recursos estratégicos más importantes del siglo XXI, el agua y la energía (USDE, 2006).

La estrecha relación que existe entre ahorro de agua y ahorro de energía viene recibiendo una atención creciente, Diaz et al., (2005); McMahon et al., (2006). Con todo, el ahorro energético es muy dependiente del lugar del ciclo en el que se racionaliza el uso del agua. La reparación de una fuga tiene, desde la óptica energética, una implicación distinta a la del ahorro de agua doméstico. Un mensaje, ahorrar agua ahorra energía, está de actualidad tal y como lo evidencia la reciente celebración (octubre de 2008) en Melbourne (www.savewatersaveenergyexpo.com.au/melbourne/) de una feria con este título.

Hasta hace bien poco el ahorro de energía en la industria del agua ha sido visto mucho más desde la óptica de la mejora de la operación (Lingireddy et Wood, 1998) y del rendimiento de las bombas (Budris, 2008) y sobre todo de la mejora de los procesos, de entre los que destaca los habidos en la desalación de agua (NRC, 2008), toda vez que son costes directos asumidos por las compañías. Por ello, la relación agua energía no ocupa un lugar destacado entre sus preocupaciones. Se encuentra en el décimo puesto de entre los catorce retos planteados en una reciente encuesta, Runge and Mann (2008). Ya que la preocupación crece con el precio del petróleo, y este aún no había llegado a sus máximos históricos (la encuesta se realiza en marzo de 2008 y su valor máximo, - próximo a los 150 dólares el barril-, se alcanza a finales de junio). Fácil es, pues, concluir que la preocupación de una *utility* depende mucho de los valores energéticos (kWh/m^3) que le correspondan en cada una de las etapas que estén bajo su responsabilidad, en general dentro de las horquillas mostradas en la Figura 3. Y así, si el agua que suministra procede de una desaladora (el gasto energético de la potabilización en ningún caso será inferior a 3.5 kWh/m^3) la preocupación será máxima mientras que si procede de una fuente natural y de calidad (el coste energético de la potabilización es muy bajo, casi nulo) el interés por la energía descenderá de manera muy importante.

Para que la industria del agua sea sensible de manera directa al binomio “ahorrar agua ahorra energía” es menester que el regulador se implique muy directamente. Porque como el ahorro de agua (por parte de los usuarios) comporta una disminución en los ingresos de la compañía, el sistema tarifario debe, de algún modo, compensar esta pérdida de ingresos, una problemática a la que la sociedad es cada vez más sensible. En cualquier caso, es incuestionable el interés por ahondar en un mejor conocimiento de la relación agua energía en cada una de las etapas del ciclo urbano del agua. El presente trabajo profundiza en la fase de distribución de agua en las redes urbanas. Hasta ahora,

los análisis de carácter global se han limitado a dividir el consumo energético (en kWh) que corresponde a esta etapa por el agua entregada a los usuarios (m^3). Su cociente permite estimar de manera aproximada el gasto energético que a esta etapa le corresponde y que para la etapa de distribución en que nos centramos en California está comprendido entre 0.18 y 0.32 kWh/ m^3 (Figura 3). El ejemplo que este artículo incluye evidencia que esa horquilla, a falta de datos más precisos, puede ser una referencia válida. Con todo, es un valor global que no aporta información sobre como se invierte esa energía a lo largo del proceso de distribución, el objetivo final de la auditoría energética que se presenta y en el que, en lo que sigue, nos centramos.

Pelli and Hitz (2000) plantean la relación agua energía en una red de distribución de manera integral y para ello proponen dos indicadores del sistema, el de infraestructura (similar al que más adelante se define como disponibilidad de energía natural) y el de calidad (equivalente al de suficiencia que aquí se considera). Es un interesante enfoque práctico que mezcla elementos externos a la red de distribución (como el rendimiento de las bombas) aunque ignora la energía que se disipa por fricción en la red, debida tanto al caudal que circula para atender demanda de los usuarios como al caudal fugado, una cuestión que sí abordan otros autores como Colombo and Karney (2002) si bien el análisis de estos plantean no es sobre la totalidad de la red y cuando lo hacen Colombo and Karney (2005) lo particularizan a un sistema concreto. Fillion et al (2004) abordan el consumo energético asociado a la vida útil de una tubería y ya más recientemente Fillion (2008) analiza la relación entre la distribución espacial de las tuberías que conforman la red y el consumo energético.

El presente análisis efectúa, a partir de la ecuación de la energía, una auditoría energética completa del sistema de distribución asociado a un volumen de control que puede identificarse con el conjunto del sistema o con un distrito hidrométrico concreto. La condición para aplicar el teorema de arrastre de Reynolds particularizado a la propiedad energía es conocer el valor de los términos que la integran sobre la superficie de control. Por ello, para poder integrar esta ecuación en el tiempo es necesario haber realizado la auditoría hídrica del sistema (conocer los flujos de agua entrante y saliente del sistema) y disponer del modelo matemático de la red para poder evaluar el comportamiento de los elementos que lo integran. En otras palabras, es necesario previamente haber resuelto el problema hidráulico, lo que equivale a conocer los caudales circulantes por las líneas y las alturas de presión en los nudos. Porque si el fluido es incompresible, White (1974), y el agua lo es, las ecuaciones mecánicas y las térmicas se desacoplan y el problema energético puede resolverse tras el hidráulico.

Un volumen de control en el que las bombas no están incluidas. Estas sólo aportan a través de sus rodets potencia hidráulica (trabajo en el eje) por lo que su eficiencia debe evaluarse al margen de la auditoría energética que se presenta. Así pues, los elementos externos más significativos son las bombas cuyo análisis energético debe realizarse al margen de la auditoría energética del sistema y que puede valorarse para diferentes estados del sistema. De este modo es muy fácil determinar con extremada precisión la contribución de las fugas a la factura energética. Basta con analizar energéticamente el sistema con fugas y sin fugas. También es inmediato, cuantificando la disminución de la energía disipada, conocer los beneficios derivados de renovar la red. Poder valorar diferentes escenarios y cuantificar mejor la relación coste/beneficio de una determinada actuación tanto para una red real como para un distrito hidrométrico de esa red es una poderosa herramienta que justifica el interés del análisis que sigue.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ecuación integral de la energía, White (2003), se aplica a un volumen de control limitado por una superficie atravesada por flujos hídricos y energéticos conocidos, lo que exige haber resuelto la auditoría hídrica y conocer el modelo matemático de la red previamente. El volumen de control se puede definir según convenga. Los elementos que no forman parte de él contribuyen con energía “de flujo” mientras que los internos son susceptibles de almacenar más o menos energía. Para evidenciar la diferencia, el caso que se presenta (Figura 4) incluye un depósito de cada tipo, uno externo (embalse) y otro interno (de compensación). Las bombas siempre van a aportar un trabajo de eje, mientras que la superficie de salida del sistema son las acometidas de los usuarios y las fugas. El modelo matemático de la red es imprescindible para, a partir de los flujos de energías entrantes, conocer los salientes. La Figura 4 representa el volumen de control junto a los flujos de agua y energía entrantes y salientes.

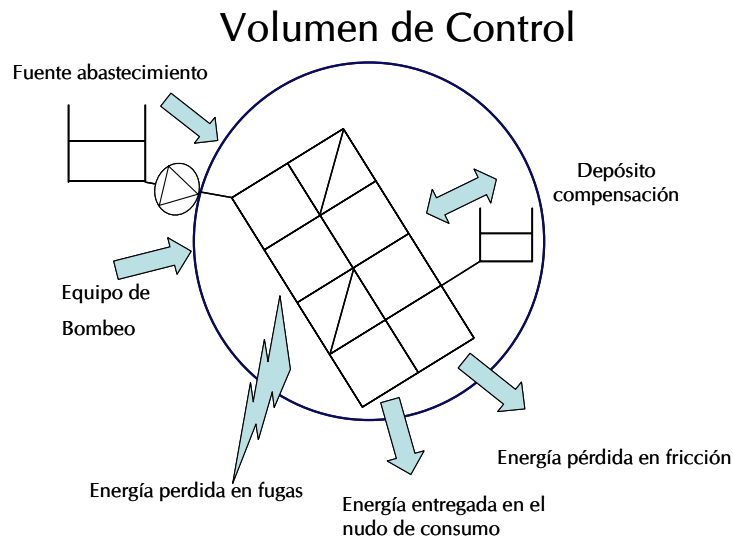


FIGURA 4. TÉRMINOS QUE INTERVIENEN EN LA AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA RED

La aplicación de la ecuación de la energía, (en realidad un balance de potencias) en su forma más general White (2003) al volumen de control de la Figura 4 permite escribir:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{vc} e \rho dV + \iint_{sc} e \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad (1)$$

Donde $\frac{dE}{dt}$ representa el intercambio de energía por unidad de tiempo entre el medio externo y el sistema, (suma del intercambio térmico, $\frac{dQ}{dt}$, y de trabajo, $\frac{dW}{dt}$), e es la energía total por unidad de masa, y ρ es la densidad del fluido (agua en este caso).

Desarrollando el término de la energía unitaria White (2003) se obtiene una nueva forma para la ecuación (2) más adecuada para el caso que se está tratando.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{dW_{eje}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \left(gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho dV + \iint_{SC} \left(\frac{P}{\rho} + gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad (2)$$

La ecuación 2 se simplifica admitiendo:

1. El agua es incompresible y su densidad ρ constante.
2. El flujo de calor a través de la superficie de control (las tuberías de la red) es nulo ($\frac{dQ}{dt} = 0$), hipótesis razonable pues la temperatura del medio que envuelve el sistema (el terreno que cubre la tubería) y la del agua que circula por su interior es, sensiblemente, la misma y por tanto el salto térmico es nulo. Sin flujo de calor, el que se disipa por fricción calentará el agua, pero su aumento es, como se vera, inapreciable, lo que refuerza esta hipótesis.
3. El trabajo de eje, W_{eje} , es el aportado por las bombas ($\frac{dW_{eje}}{dt} = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi}$).
4. Como es habitual en el análisis de redes, se desprecia el término cinético ($\frac{v^2}{2}$).
5. El análisis energético que se plantea es cuasi-estático y su extensión en el tiempo es una simulación energética en periodo extendido. En cada intervalo de cálculo la energía en el interior del volumen de control es, por lo que a las tuberías se refiere, constante y su variación temporal nula. Sin embargo la energía potencial en los depósitos puede cambiar.
6. El flujo en las superficies de entrada y salida del flujo (secciones rectas de las tuberías) es uniforme.

En estas condiciones la ecuación de la energía se escribe:

$$\sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \rho g \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z dV + \rho \sum_{Salidas} Q_{Si} \left[\frac{P_{Si}}{\rho} + gz_{Si} + u_{Si} \right] - \rho Q_E \left[\frac{P_E}{\rho} + gz_E + u_E \right] \quad (3)$$

Tres son los elementos de contorno "tipo" de las redes de agua embalses, depósitos y bombas (Rossman, 2000). La aportación energética de los embalses, exteriores al sistema, es constante e igual a su cota. Desde la óptica del sistema que se analiza es una energía "natural" z_N , en contraposición con la "artificial" de bombeo. La aportación de un depósito es también de tipo natural, $z_N(t)$, pero con una cota variable en el tiempo. En cuanto a los flujos de salida a través de los nudos, las energías unitarias son las alturas piezométricas, de tal manera que para nudo genérico de salida i será

$H_{Si} = \frac{P_{Si}}{\gamma} + z_{Si}$, un valor que depende del origen de cotas y que, cual se verá, también condiciona el valor final de los indicadores energéticos. Por ello es razonable asignar como referencia, $z=0$, para el nudo de la red con menor cota.

A partir de cuanto antecede, para un sistema alimentado desde n_N embalses, con n_p bombes que aportan energía al sistema, y con n_c depósitos de compensación, la ecuación (4) queda:

$$P_0 = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \sum_{Salidas} \gamma Q_{Si} H_{Si} + \rho \left[\sum_{Salidas} Q_{Si} u_{Si} - Q_N u_N \right] + \gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z dV \quad (4)$$

El precedente balance de potencias referido a todo el sistema recuerda el balance energético de Bernoulli aplicado a los extremos de una conducción. En efecto, de izquierda a derecha, los términos de la ecuación (4) representan lo que sigue:

- La potencia de entrada que los embalses y depósitos ponen a disposición del sistema es $P_N = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni}$. Es, desde la óptica del sistema que se analiza, una potencia natural.
- La potencia que aportan las bombas es $P_p = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi}$. Es una potencia “artificial” pues requiere una fuente de alimentación externa, en general un motor eléctrico.
- La potencia de entrada total, P_0 , es la suma de las dos precedentes.
- El término $\sum_{Salidas} \gamma Q_{Si} H_{Si}$ es la potencia saliente del sistema por los nudos de la red. Es la suma de la potencia a disposición de los usuarios o potencia útil P_U y las pérdidas que con las fugas P_L escapan de la red
- El término $\rho \left[\sum_{Salidas} Q_{Si} u_{Si} - Q_N u_N \right]$ representa la variación por unidad de tiempo de la energía interna del agua en el interior del sistema. En ausencia de intercambio de calor con el entorno, ese aumento temporal de energía interna P_F es igual a potencia requerida para vencer la fricción entre fluido y la tubería P_F .
- Finalmente, el término $\gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z dV = \sum_i^{n_c} \pm \Delta P_{Ci} = \pm \Delta P_C$ es la variación en el tiempo, positiva o negativa, de la energía potencial de los n_c depósitos que forman parte del sistema.

Por cuanto antecede, la ecuación (4) puede expresarse de manera mucho más compacta según (5).

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F \pm \Delta P_C \quad (5)$$

Una ecuación de lectura inmediata. La potencia cedida a la red de distribución desde el exterior más la potencia de eje es igual a la potencia entregada a los usuarios, más la suma de las pérdidas (fugas y fricción mecánica) más el término de compensación del depósito de cola. Cual se verá, el término de compensación pierde relevancia a medida que se alarga el periodo temporal de integración, de tal manera que cuando la auditoría de energías se extiende a lo largo de un año su contribución es inapreciable.

La ecuación (5), aunque es mucho más general, recuerda la de Bernoulli. Los balances energéticos que establecen se asemejan mucho, aunque en el caso que nos ocupa se aplica a un sistema complejo, en particular a una red de distribución de agua y no, como en el caso de la ecuación de Bernoulli, a dos puntos de una misma tubería.

En lo que sigue, la ecuación (5) se adecua para su posterior integración en periodo extendido.

3 INTEGRACIÓN EN PERIODO EXTENDIDO DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

La ecuación (5) se integra a lo largo del tiempo mediante un proceso totalmente análogo al que se sigue para simular en el tiempo el comportamiento hidráulico de la red, una integración que convierte los términos de potencia en términos de energía.

Previamente es necesario adoptar una notación que indique el origen de cada término, el elemento de la red y el intervalo de tiempo al que está referido. La notación adoptada la detalla la Figura 5:

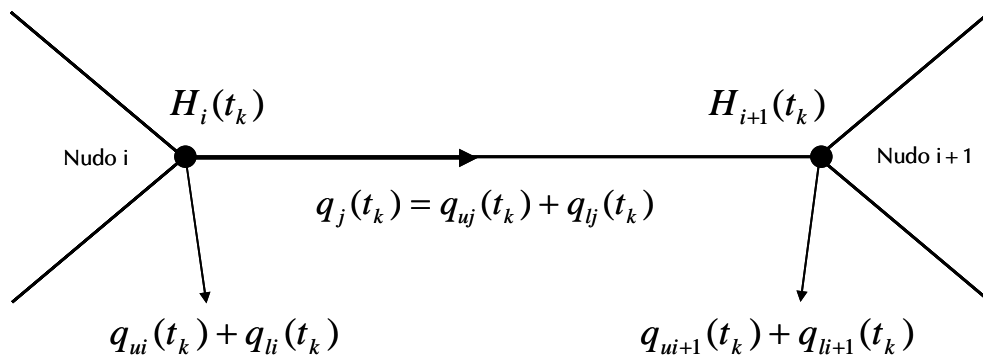


FIGURA 5. NOTACIÓN UTILIZADA PARA LOS NUDOS Y LÍNEAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

$q_{uj}(t_k)$ Caudal consumido útil que circula por la línea j en el instante t_k .

$q_{lj}(t_k)$ Caudal fugado en la línea j en el instante t_k .

$H_i(t_k)$ Altura piezométrica en el nudo i a la hora t_k .

La notación empleada para representar las energías resultantes de la integración con respecto al tiempo de la ecuación (5) son:

TABLA 1. NOTACIÓN EMPLEADA EN LA DEFINICIÓN DE LAS ENERGÍAS ACTUANTES EN EL SISTEMA

Tipo de energía	Notación
Energía natural suministrada (procedente del embalse)	$E_N(t)$
Energía de eje (suministra por el grupo de bombeo)	$E_P(t)$
Energía útil cedida con la demanda de caudal de los usuarios	$E_U(t)$
Energía asociada a las fugas	$E_L(t)$
Energía invertida en vencer el rozamiento (fricción en las tuberías)	$E_F(t)$
Energía de compensación (asociada a depósitos del sistema)	$E_C(t)$

3.1 Energía entrante en la red, aportada por el embalse

La energía externa suministrada (por el embalse o depósito de cabecera), es:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \left(\sum_k Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) \quad (6)$$

Donde γ es el peso específico del agua, $Q_N(t_k)$ es el caudal (m³/s) aportado por el embalse en el instante t_k , $H_N(t_k)$ es su altura piezométrica (m.c.a.) en el instante t_k , y Δt_k el intervalo de tiempo (s) considerado. Dado que se realiza un análisis en periodo extendido, durante un intervalo de tiempo establecido, hay que sumar los k instantes que integran el periodo de análisis. Si la altura del embalse es, a lo largo del periodo de integración, constante la expresión (6) se simplifica, resultando:

$$E_N(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \nabla_{Ni} \cdot H_{Ni} \quad (7)$$

Donde ∇_{Ni} es el volumen (m³) aportado por el embalse i durante todo el periodo de análisis y H_{Ni} es la altura piezométrica (m) del agua en ese embalse. La ecuación (7) refleja la energía entrante en el sistema para el análisis del gasto unitario (en Kwh/m³) en esta fase de distribución, con independencia del historial previo seguido por el agua hasta ingresar en el sistema (la Figura 3 muestra las etapas satisfechas). El hecho de que el agua proceda de una fuente natural o de una desaladora, aunque esencial en un planteamiento energético global, para nada condiciona los resultados de esta fase.

3.2 Energía entrante en la red, aportada por el equipo de bombeo (energía de eje)

El trabajo de eje aportado por la bomba es:

$$E_P(t) = \gamma \cdot \sum_i^{n_p} \left(\sum_k Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) \quad (8)$$

Donde $Q_{Pi}(t_k)$ es el caudal (m³/s) trasegado por el equipo de bombeo en el instante t_k , $H_P(t_k)$ es la altura (m) de bombeo, y Δt_k el intervalo de tiempo (s) considerado. Este cálculo debe realizarse para el total de las n_p estaciones de bombeo que suministran trabajo de eje al sistema en los diferentes instantes de tiempo k . En este análisis el rendimiento de las estaciones de bombeo, un parámetro esencial a la hora de optimizar la energía total demandada por el sistema, no interviene de manera directa.

3.3 Energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo

El objetivo de una red es satisfacer las necesidades de los usuarios entregando el agua, y la energía asociada a ella, a los usuarios. La energía útil entregada es:

$$E_U(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (9)$$

Donde n es el número de nudos de consumo de la red de distribución, $q_{ui}(t_k)$ es el caudal (m^3/s) entregado a los abonados en el nudo i en el instante t_k , y $H_i(t_k)$ es la altura piezométrica (m) en el nudo i en el instante t_k .

3.4 Energía saliente de la red, a través de las fugas existentes

Las fugas se concentran en los nudos y su valor depende de la presión. Representan una salida de energía de la red, formalmente análoga a la entregada a los usuarios aunque desde la óptica de la auditoría energético es energía perdida igual a:

$$E_L(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (10)$$

Con n número de nudos con fugas de la red, $q_{li}(t_k)$ es el caudal fugado (m^3/s) en las tuberías adyacentes al nudo i (y, por tanto, asociadas a él) en el instante t_k , y $H_i(t_k)$ es la altura piezométrica (m) en el instante t_k en el nudo donde se localiza la fuga $q_{li}(t_k)$.

3.5 Energía disipada en la fricción del agua con las tuberías

La energía disipada debida al rozamiento del agua con las tuberías del sistema es:

$$E_F(t) = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{j=1}^l (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \quad (11)$$

Donde l es el número de líneas de la red de distribución, $\Delta h_j(t_k)$ la pérdida de carga (m) de la línea j en el instante t_k (este término es la diferencia de alturas piezométricas entre el nudo final e inicial de la tubería j, razón por la cual se precisa el modelo matemático de la red), $q_{uj}(t_k)$ es el caudal de línea j necesario para atender la demanda de los usuarios y $q_{lj}(t_k)$ es el caudal de línea j que finalmente se perderá en fugas. De este modo el caudal total de la línea j $q_j(t_k)$ es la suma de los precedentes (Figura 5) e igual a:

$$q_j(t_k) = q_{ij}(t_k) + q_{l_i,l}(t_k) \quad (12)$$

La relación (11) evidencia que el caudal fugado (circula por parte de la red antes de escapar de la misma) genera una pérdida de carga adicional. La auditoría energética que se propone permitirá conocer el importe de esta energía adicional. Bastará con simular el comportamiento de la red con y sin fugas.

3.6 Término energético de compensación del depósito de cola

Son muchas las redes de abastecimiento de agua potable que disponen de un depósito que acumula agua en horas valle y lo suministra en horas punta. El flujo neto de agua y energía integrado a lo largo de un tiempo suficientemente largo es nulo por lo que al no contribuir aportando flujos netos lo razonable es que forman parte del mismo sistema. Obviamente durante la operación normal del sistema, actúan alternativamente como fuentes y sumideros de masa y energía por lo que al final de la simulación se debe valorar su contribución final. Si el nivel en el instante inicial es mayor que en el instante final, el depósito ha actuado como fuente de masa y de energía mientras que en caso contrario será un sumidero.

A partir de energía potencial que almacena un tanque (supuesto en este caso de sección constante) y de su variación temporal con el nivel de agua se obtiene la energía de compensación en el intervalo de tiempo considerado. Fácilmente se deduce que:

$$\Delta E_C = E_{C_f} - E_{C_i} = \frac{\gamma \cdot A}{2} (z^2(t_f) - z^2(t_i)) \quad (13)$$

Donde A es la sección del depósito (m^2) mientras $z(t_f)$ y $z(t_i)$ son los niveles (m) de la superficie libre de agua en los instantes de tiempo extremos.

4 AUDITORÍA GLOBAL DE ENERGÍAS

El balance energético para el periodo considerado, resultado de integrar en el tiempo la ecuación (4), mantiene un paralelismo completo con esta ecuación de partida, bien que ahora los diferentes términos son energías y no potencias. Energías que, aparte la de compensación cuando interviene, entran, se disipan o salen del sistema, lo que permite escribir:

$$E_{input} = E_N(t) + E_P(t) = E_U(t) + E_L(t) + \Delta E_C + E_F(t) = E_{Output} + \Delta E_{compensation} + E_{Dissipated} \quad (14)$$

O, bien, desarrollando los términos:

$$\begin{aligned} & \gamma \cdot \sum_i^{n_N} \left(\sum_k Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) + \gamma \cdot \sum_i^{n_P} \left(\sum_k Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) = \\ & = \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k + \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k + \\ & + \frac{\gamma \cdot A}{2} \left(z^2(t_f) - z^2(t_i) \right) + \gamma \cdot \sum_k \left(\sum_{j=1}^l (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k \end{aligned} \quad (15)$$

El término de compensación, ya se ha dicho, pierde su relevancia cuando el periodo de tiempo es largo. Por ejemplo cuando se realiza una auditoría energética anual pierde toda su relevancia y la ecuación (14) se simplifica, resultando:

$$E_{Input} = E_N(t) + E_P(t) = E_U(t) + E_L(t) + E_F(t) = E_{Output} + E_{Dissipated} \quad (16)$$

Valida para tiempos de cálculo suficientemente largos y como la auditoría energética necesita previamente la hídrica, que se acostumbra a plantear sobre periodos anuales, lo habitual será realizar la auditoría energética a partir de la ecuación (16), que de manera grafica (Tabla 2) se esquematiza cual sigue:

TABLA 2. ESQUEMA DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA EN EL LARGO PLAZO EN UNA RED .

E_{Input}	$E_N(t)$	$E_U(t)$	E_{Output}
		$E_L(t)$	
	$E_P(t)$	$E_F(t)$	$E_{Dissipated}$

5 INDICADORES ENERGÉTICOS BÁSICOS

El indicador tradicional energético se expresa en kWh/m³, resultado de dividir el trabajo de eje y el volumen de agua registrado. Los indicadores propuestos proporcionan una idea rápida y calibrada de aspectos básicos relacionados con el servicio y tienen sentido, en línea con lo expresado, en el largo plazo, lo que permite ignorar el término de compensación. Las energías piezométricas están referidas al nudo de cota menor a quien se le asigna el valor $z=0$.

5.1 Características del sistema

En cada abastecimiento tiene, desde la óptica energética, unas características físicas diferentes. Pueden existir o no desniveles entre las distintas zonas del mismo y requerir bombeos en cabecera o intermedios. Y así por ejemplo un sistema abastecido por un manantial situado a una cota desde la que abastece todo el núcleo urbano, es el caso más favorable, toda vez que no se requiere ningún bombeo. El caso opuesto es un suministro de agua procedente de un pozo profundo en donde toda la energía necesaria proceda de bombeos. La diferencia entre estas dos situaciones extremas la visualizaría el indicador I_1 de la ecuación (17). Muestra qué parte de la energía total inyectada al sistema procede es natural.

$$\text{Procedencia de la energía: } I_1 = \frac{E_N(t)}{E_{Input}} \quad (17)$$

Lógicamente, el valor máximo que puede tomar I_1 es igual la unidad cuando toda la energía inyectada en la red es gravitatoria, gracias a la cota suficiente de los depósitos de cabecera. Sería cero en caso contrario, es decir, cuando toda la energía inyectada procede de bombeos. Los valores intermedios de la horquilla (0,1) dependen, para un mismo sistema, de las cotas del sistema.

Además de la procedencia de la energía, también es de interés conocer la mayor o menor dificultad de gestionar una red energéticamente, es decir manteniendo el nivel de presiones ligeramente superior al mínimo exigido y lo más constante posible. La desviación típica de las cotas de todos sus nudos puede proporcionar esta información. De este modo I_2 es un indicador de la dificultad de gestión energética del sistema. Se tiene:

$$\text{Dificultad de gestión energética óptima: } I_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2}{N}} \quad (18)$$

Cabe destacar que éste será el único indicador que se expresa en unidades (las mismas que las cotas, como desviación típica que es). Los valores que puede tomar quedan tan sólo restringidos a los números positivos, indicando, cuanto mayor sea su cuantía, la existencia de diferencias de cota mayores entre los nudos de la red, y quedando como representativo el valor nulo para redes planas con todos los nudos a la misma cota.

5.2 Eficiencia energética de la red

Los dos indicadores precedentes sintetizan las características topográficas del sistema y por ello son indicadores externos. Los que siguen evalúan la gestión energética de la red y por ello son susceptibles de mejora. Para relacionar los términos fundamentales de la auditoría energética (Figura 6) basta con tres indicadores relacionados. Son

$$\text{Eficiencia global de la red: } I_3 = \frac{E_U(t)}{E_{Input}} \quad (19)$$

$$\text{Porcentaje de energía disipada: } I_4 = \frac{E_{Dissipated}}{E_{Input}} = \frac{E_F(t)}{E_{Input}} \quad (20)$$

$$\text{Porcentaje de energía pérdida en fugas: } I_5 = \frac{E_L(t)}{E_{Input}} \quad (21)$$

I_3 es el indicador principal puesto que el primer objetivo de un sistema es dar servicio a los abonados, por ello es básico calcular un primer rendimiento que indique qué porcentaje de energía, sobre toda la energía inyectada en cabecera de red, es útil. Cuanto mayor sea el valor de I_3 mayor es la eficiencia energética en la distribución de agua, siendo físicamente imposible alcanzar el valor ideal de la unidad.

En segundo lugar, el indicador I_4 representa la capacidad hidráulica de la red para cumplir adecuadamente con su función de distribución de agua, la cual exige, sobre todo, que el dimensionamiento de las conducciones sea correcto. Si ello no es así, las pérdidas de carga resultarían excesivas suponiendo un malgasto energético innecesario y llevando a valores de I_4 demasiado altos. Si bien este indicador no puede tomar el valor ideal de cero, puesto que eliminar las pérdidas de carga supone un dimensionado irracional y antieconómico, debe mantenerse en cifras razonables.

Por último, la proporción de la energía inyectada que se escapa con las fugas la proporciona el indicador I_5 , aunque hay que aclarar que el “peaje” energético que suponen las fugas supera el que proporciona I_5 , que no contabiliza las pérdidas de

fricción adicionales generadas por el caudal de fugas circulante. Se vuelve sobre esta cuestión más adelante.

Los tres indicadores definidos están relacionados entre sí [$I_3 = 1 - (I_4 + I_5)$]. Viene a decir que las pérdidas, con independencia del tipo que sean, contribuyen a restar eficiencia.

5.3 Potencial de mejora mediante la regulación de la presión

Mantener el nivel de presiones tan bajo como sea posible, aunque siempre igual a superior al mínimo establecido, es un objetivo fundamental en la gestión de una red, resulta inevitable que en determinados momentos y áreas, dicho nivel se sitúe en mayor o menor medida por encima del mínimo exigible, incluso como medida preventiva de garantía de suministro. El análisis energético propuesto en este artículo permite calcular la energía entregada a los usuarios y, así, permite también compararla con la que sería estrictamente necesaria de acuerdo con la presión mínima exigible en dichos puntos de consumo. Siendo la altura piezométrica mínima necesaria en cada nudo de la red la resultante del cálculo $h_{Min} = z + P_{Min} / \gamma$, y planteando directamente el cálculo final para toda la red a largo plazo, se obtiene la expresión de la ecuación (22).

$$\text{Suficiencia del servicio } I_6 = \frac{E_U(t)}{E_{UsefulMin.}} = \frac{E_U(t)}{\gamma \cdot Q_U \cdot h_{Min} \cdot \Delta t} \quad (22)$$

Debido a la dependencia de este indicador con el tiempo (también en sentido estricto con el nudo, aunque el indicador se plantea sobre valores globales), al calcular I_6 debe cuidarse de que el intervalo de tiempo Δt sea el mismo para los dos términos que intervienen en la ecuación (22), es decir $E_U(t)$, y Q_U (caudal promedio de consumo para toda la red).

De acuerdo con lo que antecede, el valor de I_6 puede resultar:

- $I_6 > 1$. Probablemente la situación más frecuente, ya que por seguridad en el servicio, la gestión de la red mantendrá niveles de presión por encima (aunque sólo sea ligeramente) de los mínimos necesarios. Cuanto más se acerque a la unidad el valor de este indicador, mayor será la eficiencia en la gestión de presiones de la red desde la perspectiva del servicio a los usuarios.
- $I_6 = 1$. Esta sería una situación ideal, puesto que no se puede mantener una presión de servicio igual al mínimo exigible en todos los nudos de la red.
- $I_6 < 1$. Este sería un rango de valores propios para redes con un nivel insuficiente de presiones, y por tanto una calidad deficiente del servicio a los usuarios.
- $I_6 = 0$. Este valor sería el correspondiente al caso particular de una red que suministrase el agua directamente a aljibes subterráneos que los usuarios tengan

instalados en sus domicilios. La presión de suministro sería entonces la atmosférica, que, tomando un valor cero como presión relativa, daría lugar a su vez a que el numerador de la ecuación (22) también fuese nulo.

6 ENERGÍA ASOCIADA A LAS FUGAS EXISTENTES DE UNA RED

El análisis de los términos energéticos evidencia que las fugas de agua existentes en una red de tuberías tienen una influencia directa en dos de ellos:

- La energía que escapa de la red con el agua fugada, puesto que ésta “vierte” al exterior, sin ningún provecho, la presión que tiene en el interior de la tubería.
- En la energía empleada en vencer la fricción con las tuberías. Evidentemente, el agua fugada primero ha circulado por las tuberías de la red y ha obligado a un gasto de energía adicional.

Así la auditoría energética presentada, y que se ilustra con un ejemplo numérico en el apartado siguiente, proporciona una idea cuantificada del origen y destino de cada término energético, también de los dos términos relacionados con la existencia de fugas, aunque no ofrece en una única cifra el sobreconsumo total de energía que las fugas conllevan. En una palabra, el peaje energético que representan.

Calcular tal peaje energético, sin embargo, no resulta difícil utilizando el mismo método de auditoría energética que aquí se ha desarrollado. Para ello, bastaría con realizar una simulación y balance de la red de distribución en la que se hayan eliminado todas las fugas (idealmente, todas ellas habrían sido reparadas). Los resultados de la auditoría en esta situación mostrarían las cifras de términos energéticos (entrantes y salientes) que tendría nuestra red en una situación ideal de ausencia de fugas. Restando de forma conjunta los términos entrantes correspondientes a la situación real (con fugas) menos los términos entrantes de la situación ideal (sin fugas) se obtendría la influencia total de la existencia de las fugas en la fase de distribución, el peaje buscado. Obviamente, igual resultado se tendría restando los términos salientes y de consumo por fricción de ambas situaciones.

La aplicación de la auditoría presentada al problema de las fugas en una red, tiene muchas otras implicaciones que, junto con la apuntada, serán no obstante objeto de un futuro trabajo.

7 EJEMPLO NUMÉRICO

Para ilustrar la auditoría presentada, a continuación se va a aplicar la misma en un caso de estudio, a lo largo del cual se van a destacar las distintas particularidades de cálculo de cada término energético en un análisis tanto a largo como a corto plazo. Si bien, desde un punto de vista conceptual, resulta coherente realizar la auditoría para los dos periodos de tiempo indicados, desde un punto de vista pragmático, es la aplicación a largo plazo (anual), la que resulta de mayor utilidad ya que es la utilizada como referencia para la comparación de resultados e indicadores.

7.1 Planteamiento del caso

El sistema considerado corresponde a un abastecimiento de agua a una población de unos 20000 habitantes con las siguientes cifras generales:

- Volumen anual de agua inyectada en red: 1.46 hm³/año, equivalente a 200 l/hab/día.
- Volumen anual de agua consumida por los usuarios finales: 1.25 hm³/año, equivalente a 175 l/hab/día.
- Volumen anual de agua perdida en fugas: 0.21 hm³/año. Considerando una longitud de red en torno a los 40 km de tuberías, el indicador de pérdidas se sitúa en los 14.6 m³/km/día o los 0.6 m³/km/h, con un rendimiento promedio general del 85.4%.

El esquema de la red es el mostrado por la Figura 6, mientras que las características de cada línea y nudo de la misma están en la Tabla 3. En ésta se puede observar cómo se ha adoptado el criterio de situar el nudo de menor cota a nivel del mar.

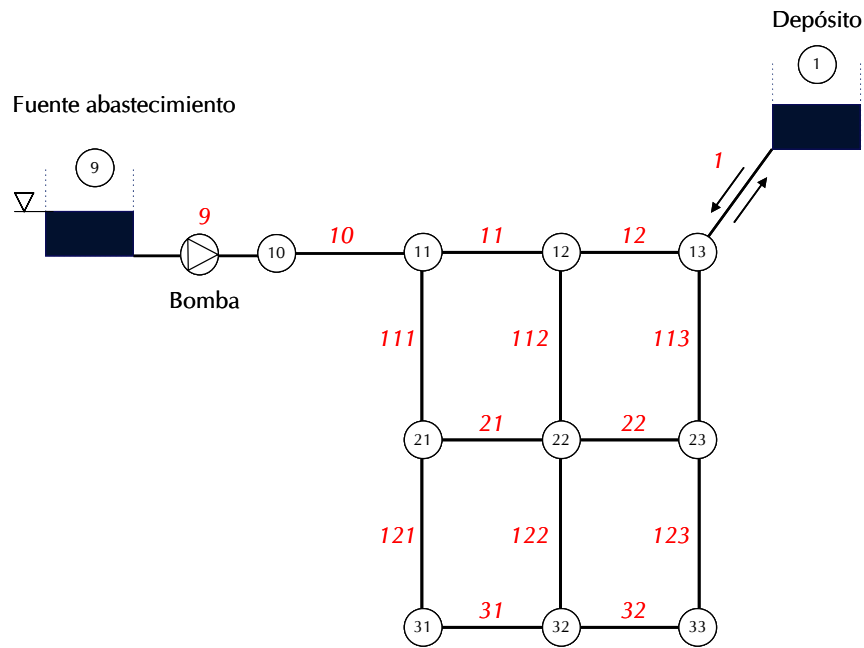


FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DE LA RED SOMETIDA A ESTUDIO

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LOS NUDOS Y LÍNEAS DE LA RED.

Línea	Longitud (km)	Diámetro (mm)	Nudo	Demanda Base	Cota	Emisor ($m^{3-\alpha}/s$)
10	2	400	Nudo 10	0	5.8	0.002611285
11	2	300	Nudo 11	5	5.8	0.010445142
12	2	350	Nudo 12	5	4	0.010445142
21	2	200	Nudo 13	3	2	0.010445142
22	2	200	Nudo 21	5	4	0.013056427
31	2	200	Nudo 22	6.5	2	0.015667712
111	4	200	Nudo 23	5	0	0.013056427
112	4	250	Nudo 31	3	4	0.007833856
113	4	300	Nudo 32	3	5	0.010445142
121	4	200	Nudo 33	3	0	0.007833856
122	4	200	Embalse	-	25	-
123	4	200	Depósito	-	32	-
32	2	200				
1	2	400				

El depósito de compensación, por su parte, tiene una sección circular con diámetro de 20m. Su altura mínima de agua es de 2m, mientras que la máxima es de 7m, encontrándose completamente vacío en el instante inicial de la simulación.

La modulación horaria del consumo se ha supuesto idéntica en todos los nudos del modelo, siendo la representada por la Figura 7.

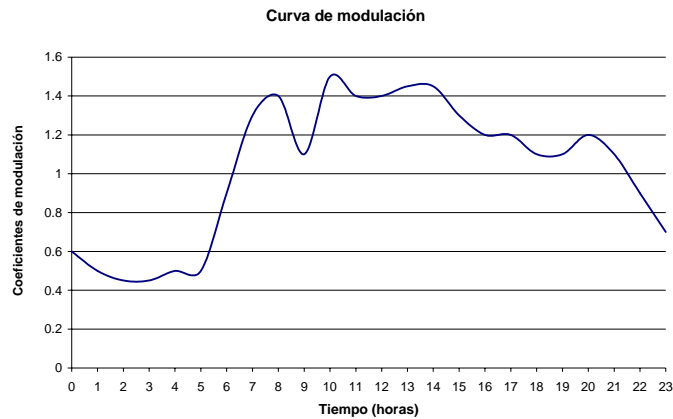


FIGURA 7. CURVA DE MODULACIÓN DIARIA EN LA RED SOMETIDA A ESTUDIO.

El total de las fugas existentes en la red se han supuesto uniformemente distribuidas según la longitud de las tuberías, y así, se han agrupado de forma ponderada en cada nudo siguiendo el método definido por Almandoz et al. (2005). Las fugas se representan como una válvula de descarga a la atmósfera (coeficiente de emisor Tabla 3), en cada nudo de la red. El dimensionamiento de cada emisor se ha realizado siguiendo a Rossman (2000), según la ecuación (23).

$$q_{ii}(t_k) = C_E \cdot \Delta H^\alpha \quad (23)$$

Donde C_E ($m^{3-\alpha} / s$) es el coeficiente de emisor asignado a cada nudo del sistema, ΔH (m) representa el salto de presiones que experimenta el agua al atravesar el orificio de fuga y α es el exponente de emisor que representa las características propias del material de la tubería y que adopta valores diferentes según el tipo de material del que está conformada la tubería.

Por último, se fijado en 25 mca la presión mínima de servicio. Debido a la modulación de los consumos y a la existencia de las fugas, se cuenta con un equipo de bombeo situado a la salida del depósito que aporta la energía necesaria para mantener el nivel de presiones cuando la cota de éste no sea suficiente. La relación altura-caudal del bombeo es la mostrada por la ecuación (24).

$$H = 93.33 - 0.003646 \cdot Q^2 \quad (24)$$

Las simulaciones se han realizado con el paquete informático EPANET 2.0 (Rossman 2000) junto con el paquete de herramientas de programación Toolkit. Esta herramienta permite la obtención de las características hidráulicas de la red sometida a estudio en un periodo extendido y variable de tiempo.

7.2 Simulación a corto plazo

En un primer análisis se han realizado simulaciones de la operación del modelo en intervalos de tiempo de un minuto, y se han obtenido los resultados totales para las 24 horas del primer día de operación.

Desde el punto de vista volumétrico, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 4, mientras que la Figura 8 muestra el caudal aportado por el embalse y la Figura 9 la evolución del nivel del agua en el depósito de cola.

TABLA 4. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA HÍDRICA DE UN DÍA MEDIO DE SIMULACIÓN (m³).

$\nabla_R = 4962.58$	$\nabla_U = 3423.42$	$\nabla_{Output} = 4962.58$
	$\nabla_L = 641.07$	
	$\Delta\nabla_T = 898.09$	

Se observa que durante este primer día, el depósito de cola detrae aproximadamente una quinta parte del volumen inyectado (898.09 m³ frente a un total de 4962.58 m³). El depósito se llena por la noche 0:00 a 4:45 y posteriormente aporta volumen a la red de abastecimiento dejando de funcionar el equipo de bombeo.

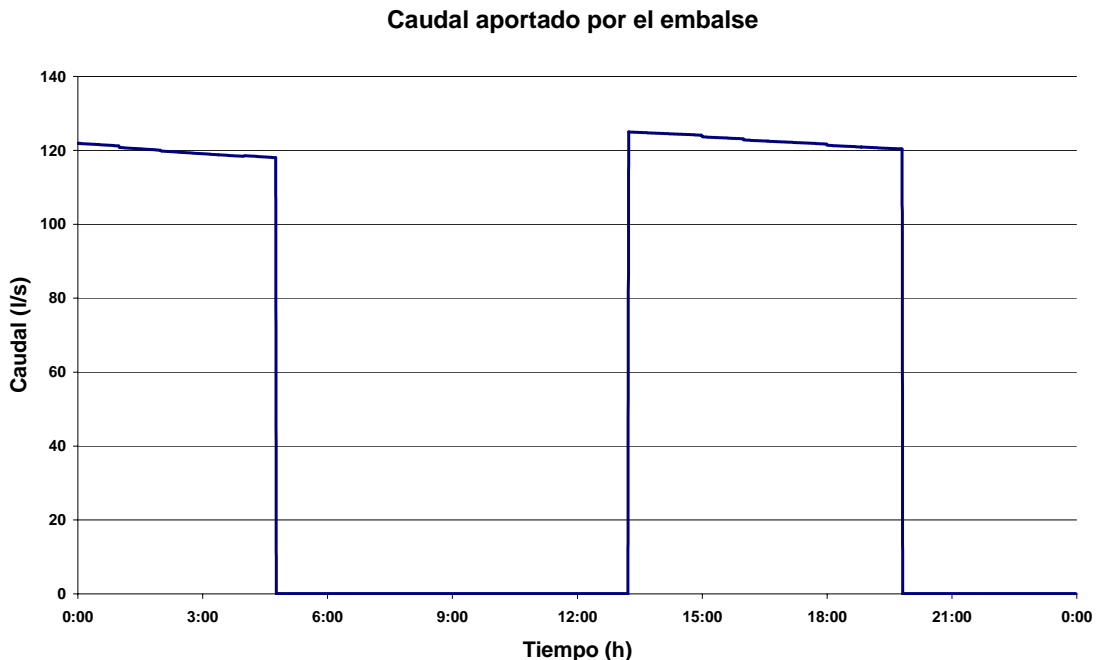


FIGURA 8. CAUDAL APORTADO POR EL EMBALSE EN EL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN

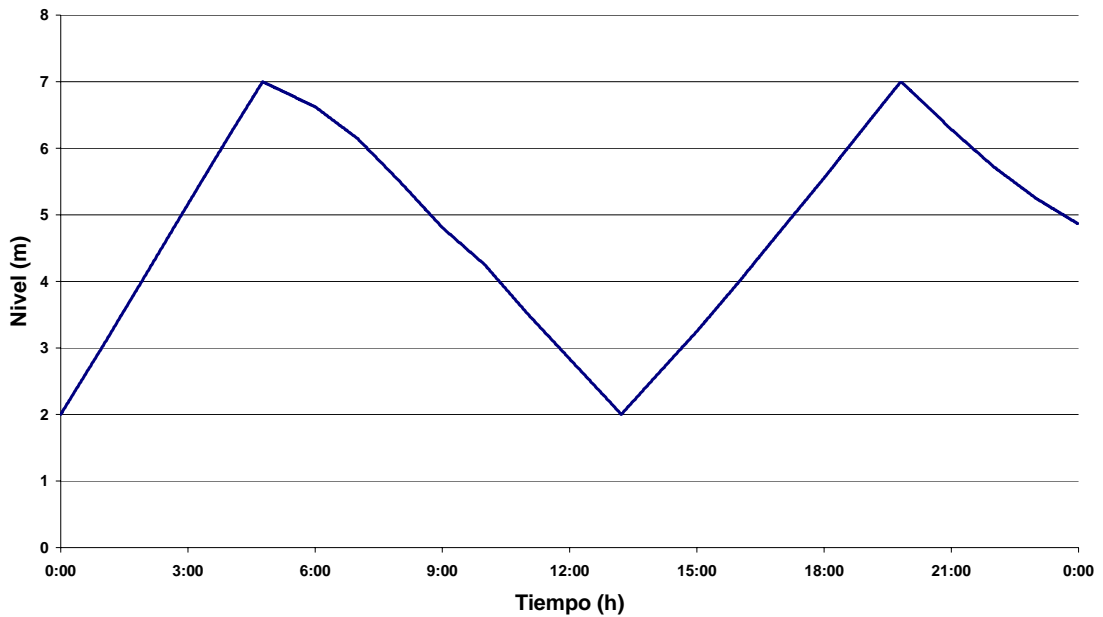


FIGURA 9. NIVEL EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DURANTE EL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN

En la Figura 10 se pueden observar el caudal consumido por todos los nudos del sistema y el caudal fugado, ambos en (l/s), a lo largo del periodo de simulación. Se puede observar que cuando el equipo de bombeo se encuentra operativo, la presión en los nudos es sensiblemente mayor y de acuerdo con las condiciones descritas en la ecuación (23), el caudal fugado también aumenta.

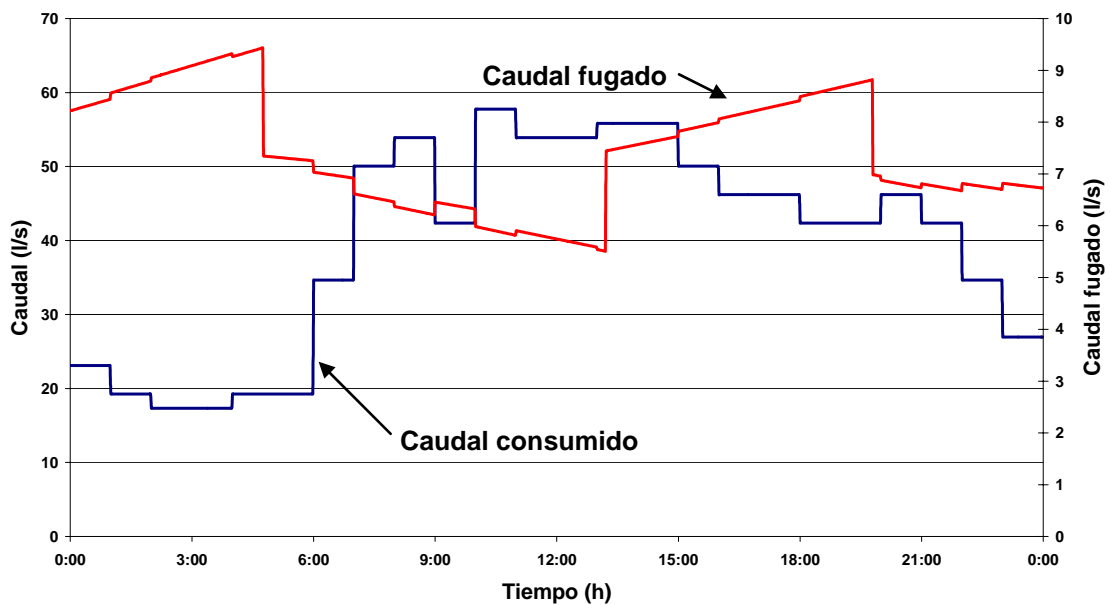


FIGURA 10. CAUDAL CONSUMIDO Y FUGADO A LO LARGO DEL DÍA.

Procediendo ahora a realizar la auditoría energética del sistema durante el primer día de simulación, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.

TABLA 5. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICO DEL PRIMER DÍA DE SIMULACIÓN (KWH/DÍA)

$E_N(t) = 534.32$ (61,2%)	$E_{Input} = 872.40$	$E_U(t) = 351.11$ (40.2%)	$E_{Output} = 507.47$ (58.2%)
		$E_L(t) = 69.60$ (8%)	
$\Delta E_T = 86.76$ (10%)		$E_{Dissipated} = 365.09$ (41.8%)	
$E_P(t) = 338.08$ (38.8%)	$E_F(t) = 365.09$ (41.8%)		

7.3 Simulación a largo plazo

Para el análisis a largo plazo se toman intervalos de tiempo de 15 minutos en cada simulación y se extiende su cálculo a todo un año. Los resultados de las auditorías se muestran en las Tabla 6 y 7.

TABLA 6. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA HÍDRICA ANUAL (HM³).

$\nabla_R = 1.463$	$\nabla_U = 1.25$	$\nabla_{Output} = 1.463$
	$\nabla_L = 0.63$	

TABLA 7. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL (MWH/AÑO).

$E_N(t) = 99,65$ (39%)	$E_{Input} = 255,21$	$E_U(t) = 126,91$ (49.5%)	$E_{Output} = 150,57$ (58.7%)
		$E_L(t) = 23,66$ (9.2%)	
$E_P(t) = 155,56$ (61%)		$E_F(t) = 105,85$ (41.3%)	$E_{Dissipated} = 105,85$ (41.3%)

Las conclusiones a la vista de todas estas cifras, pueden resumirse como sigue:

- El embalse aporta el 39 % del total energético, y la bomba el 61% restante.
- El 49.5% de la energía aportada se entrega a los usuarios, un 9,2% se escapa del sistema con el agua fugada, y el 41.3% restante es energía de fricción, disipación debida tanto al caudal demandado como al fugado.

- Como se ha apuntado más atrás, al extender el análisis a todo un año, la influencia del depósito de cola en los análisis es despreciable frente a las de los demás términos.
- La energía empleada en vencer la fricción mecánica del agua es, en promedio, $E_f(t) = 105.85$ MWh/año. Recordando la hipótesis realizada (no hay intercambio térmico) el aumento de energía interna viene dado por la relación $\rho \cdot (\sum Q_{si} \cdot u_{si} - Q_N \cdot u_N) = E_F(t)$. Aplicando los valores correspondientes ($\rho = 1000$ kg/m³ y $C_p = 4180$ J/Kg/K) y recordando que en un líquido $\Delta u = C_p \cdot \Delta T$, el incremento de temperatura medio para toda la red resulta 0.06°C.
- Los indicadores propuestos en el artículo resultan ser:

TABLA 8. VALOR NUMÉRICO DE LOS INDICADORES PROPUESTOS.

I_1	I_2 (m)	I_3	I_4	I_5	I_6
0.39	2.05	0.50	0.41	0.09	1.33

7.4 Sensibilidad de los indicadores ante condiciones alternativas del sistema

El ejemplo numérico presentado incluye todas las particularidades propias de un sistema real. Sin embargo, una condición fundamental para todo el análisis energético es la disponibilidad o no de cota de agua en cabecera. Cuanto mayor sea ésta, menor será la dependencia del adecuado nivel de servicio con los bombeos para inyección a red, y en consecuencia, menor será el consumo de éstos últimos. Para valorar la sensibilidad tanto de la propia auditoría como, de los indicadores propuestos se han evaluado en el largo plazo dos alternativas al ejemplo numérico propuesto:

- La alternativa 1 representa el caso de un sistema que no dispone de cota de agua en cabecera, bien por condiciones puramente orográficas o bien porque bombea el agua desde pozos. Los datos del modelo en este caso son los mismos que los del ejemplo numérico ya presentado, excepto para la cota de agua en el embalse, que ahora es 0 m, y la curva de la bomba, que con el fin de mantener el mismo suministro que en el ejemplo resuelto se ha elevado en 25 mca.
- La alternativa 2 representa el caso de un sistema que dispone de suficiente cota de agua en cabecera como para no necesitar bombeos de inyección complementarios. Los datos del modelo en este caso son los mismos que los del ejemplo numérico presentado, excepto para la cota de agua en el embalse, que ahora es de 63.27 m, correspondientes a la altura aportada por el embalse en el

ejemplo anterior (25 m.c.a.) y la altura proporcionada por el equipo de bombeo (38.27 m.c.a.) para el caudal medio inyectado en red.

El balance hídrico para cada alternativa resulta prácticamente idéntico al ya visto para el caso previo (Tabla 6). Los valores de la auditoría energética se muestran en la Tabla 9.

TABLA 9. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL ALTERNATIVA 1 (MWh/año).

$E_N(t) = 0$	$E_{Input} = 256,16$	$E_U(t) = 126,96$ (49.65%)	$E_{Output} = 151,25$ (59.2%)
		$E_L(t) = 24,29$ (9.55%)	
$E_P(t) = 256,16$		$E_F(t) = 104,21$ (40.8%)	$E_{Dissipated} = 104,21$ (40.8%)

TABLA 10. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA ENERGÉTICA ANUAL ALTERNATIVA 2 (MWh/año).

$E_N(t) = 255,71$	$E_{Input} = 257,71$	$E_U(t) = 127,05$ (49.7%)	$E_{Output} = 150,68$ (59%)
		$E_L(t) = 23,63$ (9.3%)	
$E_P(t) = 0$		$E_F(t) = 104,57$ (41%)	$E_{Dissipated} = 104,57$ (41%)

Por último, los resultados obtenidos para los indicadores propuestos son idénticos a los presentados en la Tabla 8, a excepción del indicador I_1 que adopta el valor 0 en la alternativa 1 (no se dispone de cota de agua en cabecera) y 1 en la alternativa 2 (donde todo el sistema se abastece mediante el embalse de cabecera sin necesidad de equipos de bombeo).

El indicador habitualmente considerado hasta ahora, expresar la energía en (kWh/ m³), es muy dependiente de la orografía del terreno y presenta los valores mostrados en la Tabla 11. Los valores calculados son del mismo orden de magnitud que los mostrados para la fase de distribución, Figura 3.

TABLA 11. VALOR NUMÉRICO DEL INDICADOR TRADICIONAL (kWh/M³).

	Ejemplo numérico	Alternativa 1	Alternativa 2
Trabajo de eje / m ³ consumido	0.106	0.175	0

8 CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología que permite establecer la auditoría energética de una red de distribución (o de un sector hidrométrico) real. Previamente, se debe haber realizado la auditoría hídrica del sistema y disponer del modelo matemático de la red que se analiza. La auditoría puede extenderse a cualquier periodo de tiempo, pero dado que el balance hídrico acostumbra a plantearse sobre un periodo anual, lo razonable es realizar la auditoría energética sobre idéntico periodo de tiempo. En el ejemplo presentado se ha realizado sobre un año y sobre el día medio de ese periodo anual.

La auditoría energética permite realizar análisis coste/beneficio más precisos y, a partir de la simulación de dos estados del sistema (el real y el renovado) y de su comparación conocer el coste energético de las fugas. El sistema renovado simulado puede incluir sólo una parte de las tuberías y, de este modo, valorar mejoras parciales. Para tomar decisiones correctas es necesario disponer de información precisa y el presente trabajo contribuye a ello.

La auditoría que se presenta se ha realizado, con un proceso de cálculo simple pero laborioso, manipulando de manera conveniente los ficheros de resultados de EPANET. Sin embargo este programa ya calcula de manera sistemática uno de los seis términos de la auditoría energética de la red, la energía de bombeo. Sería especialmente útil que, incorporando las rutinas de cálculo correspondiente, EPANET también evaluase los cinco términos adicionales de la auditoría, que se reducen a cuatro cuando el periodo de cálculo es largo y pierde relevancia el término de compensación de energía del sistema. De este modo el gestor de la red dispondría de manera automática de una información relevante, la auditoría energética del sistema de control.

9 REFERENCIAS

Almandoz, J.; Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. and Cobacho R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation". *Journal of Water resources Planning and Management*, 131(6), 458-466.

Budris, A.R. (2008). "Parallel pumps: Reduce Energy Cost without breaking the budget" *American Water Works Association*, 34 (2), 22-25.

CEC (California Energy Commission), (2005). "California's Water-Energy Relationship report". California

Colombo A.F. and Karney B.W. (2002). "Energy cost of leaky pipes: Toward comprehensive picture". *Journal of water resources, planning and management*, 128(6), 441-450.

Colombo A.F. and Karney B.W. (2005). "Impacts of leaks on Energy Consumption in Pumped Systems with storage". *Journal of water resources, planning and management*, 131(2). 146-155.

Diaz, C.A., Karney, B.W. and Colombo, A.F. (2005) "Saving energy while managing demand in water delivery systems". *Proc., CCWI 2005 8th Int. Conference on Computing and Control in the Water Industry.*, Research Studies Press, Hertfordshire, U.K.

Filion, Y.R. (2008). "Impact of urban Form on Energy Use in Water Distribution Systems". *Journal of Infrastructure Systems*, 14(4). 337-346.

Filion, Y., MacLean, H.L. and Karney B.W. (2004). "Life cycle Energy Analysis of a Water Distribution System". *Journal of Infrastructure Systems*, 10 (3), 120-130.

IEA (International Energy Agency), (2008). "Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050".

Lingireddy, S. and Wood, J. (1998) "Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps". *Journal of Energy Engineering*, 124 (3), 90-103.

McMahon, J.E., Whitehead, C.D. and Biermayer, P. (2006). "Saving Water Saves Energy". *Lawrence Berkeley National Laboratory*. University of California.

NRC (National Research Council of the national academies), (2008) "Desalination. A national perspective The national academies press, Washington, USA.

Pelli, T. and Hitz, H.U. (2000). "Energy Indicators and savings in water supply". Journal American Water Works Association, Vol92 (6), June 2000.55-62.

Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: *User's manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.

Runge, J. and Mann, J. (2008) "State of the industry report, 2008". Journal American Water Works Association, 100 (10), 61-74.

USDE (United States Department of Energy), (2006). "Energy Demands on Water Resources. Report to congress on the interdependency of energy and Water".

White, F.M. (2003) "Fluid Mechanics" 5th Ed. Mc Graw-Hill, New York. Chapter 3. Integral relations for a control volume.

White, F.M. (1974) "Viscous fluid flow". B.J. Clark and Michael Gardner eds, McGraw-Hill, New York. Chapter 3. Solutions of the Newtonian viscous-flow equations.

10 GLOSARIO DE TÉRMINOS

A Sección del depósito (m^2)

C_p Calor específico del Agua = 4180 J/Kg/K

e Energía por unidad de masa

E Energía total del sistema

$E_c(t)$ Energía de compensación

$E_c(t_i)$ Energía de compensación en el instante inicial del cálculo

$E_c(t_f)$ Energía de compensación en el instante final del cálculo

$E_F(t)$ Energía invertida en vencer el rozamiento, fricción en las tuberías en periodo anual

$E_{Dissipaed}$ Energía disipada por fricción. $E_{Dissipaed} = E_F(t)$

E_{Input} Energía entrante o invertida en el sistema

$E_L(t)$ Energía asociada a las fugas

$E_N(t)$ Energía proporcionada por el embalse

E_{Output} Energía saliente o consumida por el sistema

$E_p(t)$ Energía proporcionada por el equipo de bombeo

$E_U(t)$ Energía útil que se entrega en los nudos

$H_i(t_k)$ Altura piezométrica del nudo i en el instante t_k .

$h_{\min i}$ Altura piezométrica mínima necesaria en el nudo i

$H_{Ni}(t_k)$ Altura piezométrica (m.c.a.) en el embalse i en el instante t_k

$H_{Pi}(t_k)$ Altura (m) de bombeo del equipo i en el instante t_k

H_{Ni} Altura piezométrica en el embalse i durante el intervalo de calculo. $H_{Ni} = H_{Ni}(t_k)$

I_1 Procedencia de la energía

I_2 Dificultad de la gestión energética optima

I_3 Eficiencia global de la red

I_4 Porcentaje de energía disipada

I_5 Porcentaje de energía perdida en fugas

I_6 Suficiencia del servicio

k Instantes de tiempo de cálculo en los que se divide el periodo total de la simulación

l Número de líneas de la red

n Número de nudos de la red

n_c Número de depósitos de compensación

n_N Número de embalses

n_p Número de bombas

P_c Potencia de compensación

P_F Potencia disipada por fricción

P_L Potencia asociada a las fugas

P_N Potencia natural aportada por el embalse

P_0 Potencia de entrada total

P_P Potencia aportada por las bombas

P_U Potencia útil que se entrega en los

$\frac{P_{ui}(t_k)}{\gamma}$ Presión en el nudo i en el instante t_k

$\frac{P_{\min}}{\gamma}$ Presión mínima de servicio en todos los nudos de la red

$q_j(t_k)$ Caudal circulante por la línea j en el instante t_k .

$q_{li}(t_k)$ Caudal fugado (m^3/s) en las tuberías adyacentes al nudo i en el instante t_k

$q_{lj}(t_k)$ Caudal circulante (m^3/s) por la línea j que posteriormente se pierde en fugas.

$q_{ui}(t_k)$ Caudal (m^3/s) consumido por el nudo i en el instante t_k

$q_{uj}(t_k)$ Caudal circulante (m^3/s) por la línea j que es posteriormente consumido

Q Calor total que se aporta, o cede, al sistema

$Q_{Ni}(t_k)$ Caudal (m^3/s) aportado por el embalse i en el instante t_k

$Q_{Pi}(t_k)$ Caudal (m^3/s) impulsado por el equipo de bombeo i en el instante t_k

Q_U Caudal (m^3/s) promedio de consumo para toda la red

t_i Instante inicial de la simulación

t_f Instante final de la simulación. $t_f = k \cdot \Delta t_k$

u Energía interna por unidad de masa

\forall_L Volumen total fugado

\forall_{Ni} Volumen (m^3) aportado por el embalse i durante todo el periodo de análisis

\forall_{Output} Volumen consumido total por la red. $\forall_{Output} = \forall_U + \forall_L$

\forall_R Volumen total inyectado en el sistema

\forall_U Volumen total consumido por el usuario

W Trabajo total que se realiza por, o sobre, el sistema

z_i Cota del nudo i

$z(t_i)$ Nivel (m) de la superficie libre de agua en el instante inicial del cálculo

$z(t_f)$ Nivel (m) de la superficie libre de agua en el instante final del cálculo

$\Delta h_j(t_k)$ Pérdida de carga (m) de la línea j en el instante t_k

Δt_k Intervalo de tiempo (s) considerado para el cálculo.

ρ Densidad del fluido = 1000 Kg/m^3

γ Peso específico del agua = 9810 N/m^3

