

Análisis de la eficiencia de un equipo de impulsión en una red de abastecimiento urbano

María del Pilar Martínez García^a, Angel Martínez Romero^b y Juan Ignacio Corcoles Tendero^c

^aEscuela de Ingenieros Industriales de Albacete, Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España, mpilar.martinez2@alu.uclm.es, ^bEscuela de Ingenieros Industriales de Albacete, Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España, angel.mromero@uclm.es y ^cEscuela de Ingenieros Industriales de Albacete, Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España, juanignacio.corcoles@uclm.es.

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

El presente trabajo se centra en una red colectiva de abastecimiento urbano en una zona ubicada en la provincia de Albacete. La red de estudio dispone de un depósito de almacenamiento de agua, que permite el abastecimiento a la población por gravedad. Este depósito es alimentado por un sondeo dotado de una electrobomba sumergida de 66 kW. Se ha realizado el análisis de la eficiencia energética y del funcionamiento de la bomba sumergida. Para ello, se han medido tanto parámetros hidráulicos como eléctricos de la instalación. En relación a las medidas registradas en el sondeo en la época de máxima demanda de agua en la red, el rendimiento total ($\eta_t = 53,5\%$) medido presenta un valor no muy elevado, posiblemente condicionado por el desgaste sufrido por el equipo dada su antigüedad. Los resultados muestran un ahorro energético aproximado del 18% en comparación con el estado actual del equipo de bombeo, aspecto que establece la necesidad de una mejora en el funcionamiento de la instalación.

Palabras clave | red de abastecimiento urbana; sondeo; eficiencia energética; ahorro energético

INTRODUCCIÓN

Según la Directiva Marco del Agua (DMA) (DOUE, 2000) el agua se considera como un patrimonio que hay que defender y tratar como tal. En este sentido, el agua se puede considerar un recurso escaso y un factor limitante para el desarrollo en diversos ámbitos en numerosas zonas, principalmente en aquellas pertenecientes a regiones áridas y semiáridas. En España este aspecto es relevante, principalmente relacionado con la escasez de precipitaciones en muchas regiones, lo que establece la necesidad de optimizar el uso de los recursos hídricos. Asimismo, ligado al consumo de agua, el gasto de energía es un aspecto fundamental, sobre todo en redes colectivas de abastecimiento donde su fuente principal de agua sean los recursos hídricos subterráneos (Córcoles et al., 2010), lo que hace imprescindible realizar un uso eficiente de los recursos hídricos y energéticos.

El objetivo de este trabajo es plantear una metodología que de forma sencilla permita a los gestores de una red de abastecimiento urbano decidir de forma objetiva el momento en el que debe plantearse la sustitución o reparación de un equipo de bombeo en función de sus condiciones de funcionamiento y precio de la energía.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El presente trabajo se centra en una red colectiva de abastecimiento urbano en una zona ubicada en la provincia de Albacete. Esta red permite el suministro de agua a una población de, aproximadamente, 2400 habitantes (INE, 2015).

La red de estudio dispone de un depósito de almacenamiento de agua, que permite el abastecimiento a la población por gravedad. Se trata de una red mixta (Figura. 1), con abastecimiento a población y a un polígono industrial. La información relativa a trazado y dimensionado de tuberías ha sido proporcionado por los gestores de la red, completada con visita a instalaciones y toma de datos en campo.

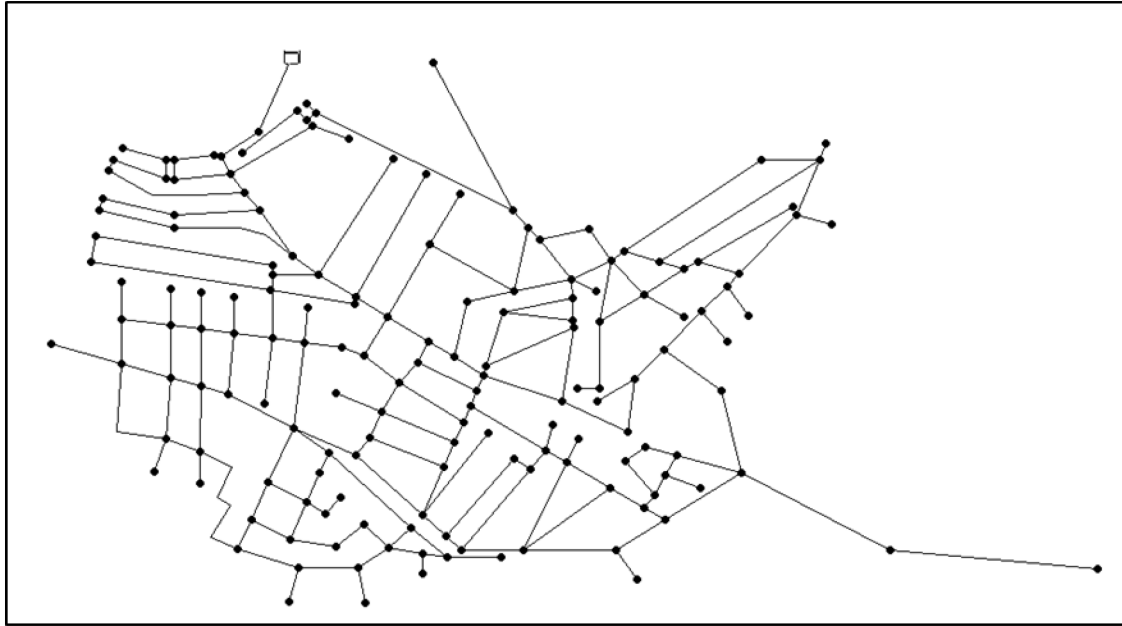


Figura 1 | Esquema de la red de estudio en el programa EPANET®.

La red dispone de un depósito que es alimentado por un único sondeo, dotado de una electrobomba sumergida vertical de 66 kW (Figura 2) instalada a una profundidad de 150 m, desde donde extrae el agua con un nivel dinámico de 132 m, aproximadamente. La columna de impulsión está compuesta por tubos de acero con soldadura longitudinal, de 6 m de longitud, con brida soldada, unidos mediante juntas de goma y tornillos. El sondeo está ubicado a una distancia de 5000 m del depósito de abastecimiento a la red. Una bancada construida por dos perfiles IPN 160 y chapa de acero sujeta la columna de impulsión. A la salida del grupo de impulsión, se ubica una válvula de compuerta y otra de retención, junto con una llave para la instalación de un manómetro.



Figura 2 | Bomba del sondeo

Adquisición de datos

Para la bomba del sondeo, se ha medido el caudal descargado empleando para ello un caudalímetro de ultrasonidos (Panametrics, Waltham, MA, USA) (Tabla 1). La instalación del caudalímetro de ultrasonidos (Figura 3) se ha realizado lo más alejado posible de elementos singulares en las tuberías de medida (Spitzer, 1991; Johnson et al., 2001), ya que pueden aparecer alteraciones por la proximidad de estos elementos, que distorsionan las medidas efectuadas.

Tabla 1 | Especificaciones del caudalímetro de ultrasonidos.

Marca	PANAMETRICS®		
Modelo	PT 868		
Rango de medida	-12.2 m s^{-1} a 12.2 m s^{-1}		
Precisión	Diámetro tubería > 150 mm	$>0.3 \text{ m s}^{-1}$	0.5 a 1 %
		$\leq 0.3 \text{ m s}^{-1}$	$\pm 0.01 \text{ m s}^{-1}$
	Diámetro tubería $\leq 150 \text{ mm}$	$>0.3 \text{ m s}^{-1}$	2 a 5 %
		$\leq 0.3 \text{ m s}^{-1}$	$\pm 0.05 \text{ m s}^{-1}$
Repetibilidad	± 0.2 a 0.5 % de escala completa		
Tipo de fluidos	Fluidos acústicamente conductivos		
Temperatura de operación	-20 a 55°C		
Tamaño de tuberías	Diámetro interno de 1 mm a 5 m (según material)		
Espesor de la pared de la tubería	Hasta 75 mm		

Fuente: Panametrics, Waltham, MA, USA.



Figura 3 | Instalación del medidor de caudal para realizar la toma de datos

De forma sincronizada a la medida de caudal, se efectuó la medida de los parámetros eléctricos en la instalación de bombeo, utilizando un analizador de redes AR5 (Circutor, Barcelona, España) (Tabla 2; Figura 4) que permite obtener diversos parámetros en cada fase de alimentación. Las medidas de intensidad con este equipo se ha realizado mediante el uso de pinzas amperimétricas tipo CPR-500 (Tabla 3). La adquisición de estos parámetros se efectúa mediante la medida de la diferencia de potencial entre fases, de la intensidad de corriente, determinando el campo magnético generado por la circulación de corriente en un conductor, y del desfase entre ondas.

Tabla 2. Características del analizador de redes AR5.

Marca	CIRCUTOR®
Modelo	AR5
Alimentación	100 V c.a - 240 V/12 V c.c
Consumo	15 VA
Temperatura de trabajo	0-40 °C
Circuito de medida	Trifásico, Aron, Monofásico y Bifásico
	20 a 500 V c.a. (fase-neutro)
	35 a 866 V c.a. (entre fases)
Medida de tensión	20 a 500 V c.a. (entre fases)
	Automático
	50 a 60 Hz
Medida de Intensidad	Según pinza
Salida de datos	Salida RS-232
Memoria interna	1 Mb

Fuentes: AR5 (2010).

**Figura 4 |** Cuadro eléctrico de la bomba del sondeo y equipo de medición

Tabla 3. Características técnicas de las pinzas amperimétricas CPR-500.

Marca	CIRCUTOR®
Modelo	CPR 500
Escala	1a 500 A c.a
Frecuencia nominal	48 a 65 Hz
Error en fondo de escala	0,7 %
Rigidez eléctrica	5,2 kV c.a / 50-60 Hz
Tensión de salida	2 V c.a
Temperatura	-10 a 55°C

Fuente: AR5 (2006).

Además del caudal y de los parámetros eléctricos, se ha realizado la medida de presión mediante la instalación de un transductor de presión (Druck, Leicester, UK) (Tabla 4). El transductor de presión empleado se encuentra conectado a una fuente de alimentación de 24 V, compuesta por dos baterías de 12 V y 45 Ah, que le permite tener un rango de medida de hasta 10 bares. El registro se realiza en un “datalogger” (Dickson, Addison, IN, USA) conectado al transductor de presión, sincronizado con el caudalímetro de ultrasonidos. Previo a la instalación del equipo, fue necesario la calibración del transductor de presión mediante el empleo de un manómetro digital con una precisión de 0,01 bar. Este equipo permite realizar la monitorización continua de la presión en el punto instalado. Se utilizó para contrastar estos datos con los del manómetro de la instalación.

Tabla 4. Características del transductor de presión.

Marca	DRUCK®
Modelo	PTX 1400
Rango	0-10 bar
Corriente de salida	4 a 20 mA
No linealidad e histéresis	± 0,25 % BSL max.
Error por temperatura	± 2 % max sobre -20°C a 80°C
Conexión eléctrica	DIN 43650
Protección al entorno (“Ingress Protection”, IP)	IP65

Fuente: Druck, Leicester, UK.

Asimismo, se ha determinado la altura manométrica de la bomba teniendo en cuenta la diferencia de cota existente entre el punto de captación del agua cuando el equipo está en funcionamiento (nivel dinámico) y el de descarga de la captación, así como las pérdidas de carga existentes en ese trayecto. Las medidas del nivel dinámico del agua se han llevado a cabo empleando una sonda de nivel del tipo eléctrica de contacto (Seba Hydrometrie, Kaufbeuren, Germany) (Figura 5).



Figura 5 | Sonda de nivel

Para el análisis del comportamiento del sondeo se ha utilizado la herramienta Análisis de Sondeos (AS) (Moreno et al., 2010) (Figura 6). Esta herramienta contrasta los datos teóricos de funcionamiento de la bomba, con los reales de funcionamiento. Así, partir de los parámetros hidráulicos y eléctricos registrados, se ha determinado el rendimiento real de la bomba, considerando el rendimiento del motor y las pérdidas eléctricas producidas por el cableado, comparando estos resultados con el rendimiento teórico de la bomba obtenido del catálogo del fabricante. Los datos requeridos por la aplicación se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos introducidos en la aplicación de Análisis de Sondeos (AS).

Profundidad de la bomba (m)	180
Diámetro interior tubería de impulsión (mm)	161
Longitud de la tubería de distribución (m)	5000
Diámetro de la tubería de distribución (mm)	161
Desnivel bocapozo- salida del agua (m)	76
Nivel dinámico (m)	132
Caudal medido (l/s)	17,74
Tensión de alimentación (V)	405
Intensidad (A)	137,6
cosFi	0,81
Longitud de cables (m)	190
Material de cables	Cobre
Factor de pérdidas (V/A Km)	0,8
Rendimiento del motor (%)	87
Potencia medida (kW)	79,05
Curvas características de la bomba (H-Q y η-Q)	Según catálogo
Precio de la energía (€/kWh)	0,077

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 6 y 7a recogen los resultados del programa AS en relación a las medidas registradas en el sondeo en la época de máxima demanda de agua en la red (Tabla 5). Para una altura manométrica requerida de 241,6 m, el caudal teórico proporcionado por la bomba debería ser de 1157 l/min, y el real es de 1064,4 l/min. Así, el rendimiento total del equipo medido ($\eta_t = 53,2\%$) presenta un valor inferior al teórico ($\eta_t = 63,5\%$), posiblemente condicionado por el desgaste sufrido por el equipo dada su antigüedad.

A partir de los datos proporcionados por los gestores de la sociedad, se ha determinado que el volumen anual medio de agua consumido en la red es de aproximadamente 168864 m³, pudiendo realizar una comparativa del gasto energético que supondría el uso de la bomba en su situación actual en comparación con el caso en el que el rendimiento de la instalación se aproximase al teórico de la misma. Los primeros resultados muestran que el consumo energético en las condiciones actuales de funcionamiento del equipo de bombeo es aproximadamente un 18% superior al que se podría obtener según los datos teóricos del fabricante, aspecto que indica la posibilidad de tomar medidas correctoras que mejoren el funcionamiento de la instalación.

The screenshot shows the 'Datos_Pozo' software interface with the following data:

Instalación sondeo		Parámetros eléctricos		Punto funcionamiento teórico		Punto funcionamiento medido	
Profundidad bomba (m)	180	Tensión alimentación (V)	405	Q (l/min)	1157	Q (l/min)	1064.4
Diámetro tubería impulsión (mm)	161	Intensidad (A)	137.6	H (m)	241.5649	H (m)	241.5649
Longitud tubería distribución (m)	5000	cosFi	0.81	Rendimiento bomba (%)	76.9683	Rendimiento bomba(%)	64.4176
Diámetro tubería distribución (mm)	161	Longitud de cables (m)	190	Rendimiento total (%)	63.5422	Rendimiento total (%)	53.1808
Desnivel bocapozo-salida agua (m)	76	Material cables	Cobre				
Nivel dinámico (m)	132	Factor pérdidas (V/A Km)	0.8				
Caudal medido (l/s)	17.74	Caída de Tensión (%)	5.1642				
Altura manométrica	241.5649	Pérdida en conductores (kW)	4.0376				
		Rendimiento motor (%)	87				
		Potencia medida (kW)	79.05				

Consumo	
Precio energía (€/kWh)	0.077
Consumo teórico (kW-h/m ³)	1.0359
Consumo real (kW-h/m ³)	1.2378
Coste diferencia (€) =	0.20184 × 168864 = 2624.411

Buttons: Cargar Datos, Guardar Datos, TERMINAR, Calcular, Figuras.

Figura 6 | Herramienta Análisis de Sondeos (AS)

De este modo, el gestor dispone de una información objetiva que le permitiría decidir sobre la conveniencia de la sustitución o reparación de la bomba, al comparar la situación actual con la teórica. El programa AS aporta información económica del ahorro que puede suponer la mejora de la eficiencia energética de la bomba. Así, el consumo energético en las condiciones reales y las teóricas es de 1,2378 y 1,0359 kW-h/m³, respectivamente (Fig. 6), por lo que, considerando un coste energético de 0,077 €/kWh, para el volumen anual consumido en un año en la población, el ahorro económico obtenido estaría alrededor de 2624 € (Figs. 6, 7b).

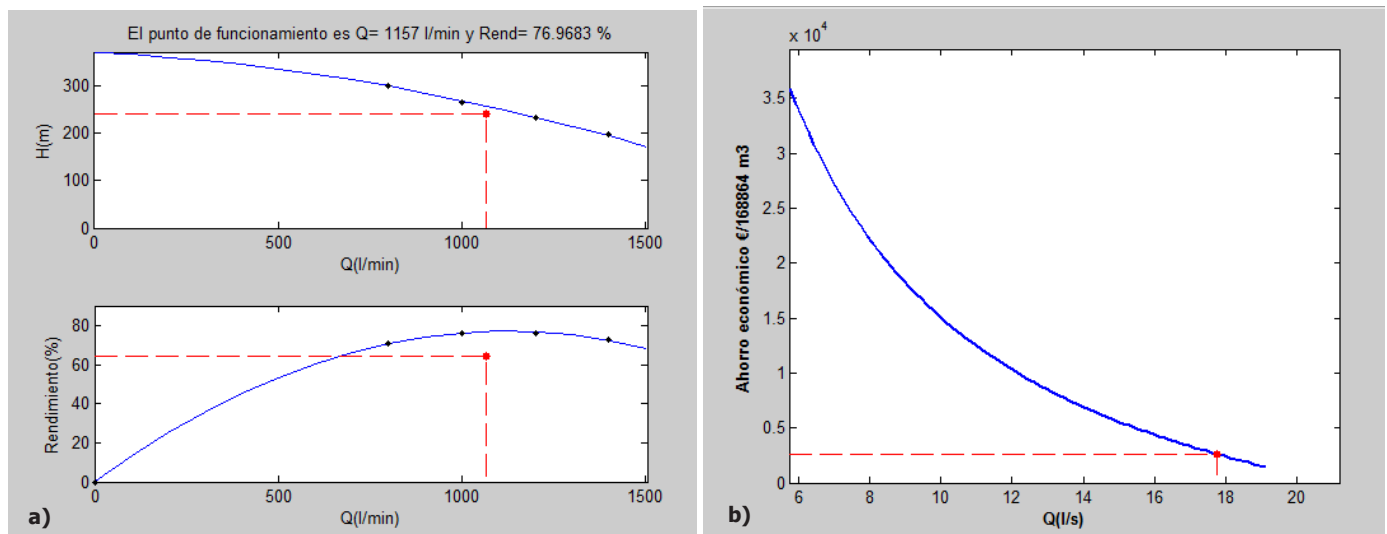


Figura 7 | Salidas gráficas de la herramienta AS. a) puntos de funcionamiento teóricos y real; b) ahorro económico anual

Puesto que el precio de la energía varía durante el periodo anual, es interesante tener en cuenta el volumen bombeado en cada hora y el coste energético asociado en ese periodo. Con los datos obtenidos para el punto de funcionamiento real con el programa AS, se pueden discriminar los ahorros que se conseguirían para los volúmenes extraídos en cada periodo tarifario. En el caso de estudio, el coste extra anual de no reparar la bomba puede establecerse en función del precio de la energía según la ecuación (1). Si se desea discriminar por volúmenes extraídos con distintos costes energéticos, se podría aplicar la ecuación (2).

$$C_a = 34083 * P \quad (1)$$

donde: C_a , es el coste extra anual (€/año); y P , es el precio de la energía en €/kWh

$$C_m = 0,20176 * \sum_{i=1}^n (V_n * P_n) \quad (2)$$

donde: C_m , es el coste extra para un volumen estudio (€); V_n , es el volumen considerado (m^3), y P_n , es el precio de la energía para ese volumen en €/kWh

La metodología planteada en este trabajo puede servir de apoyo a la caracterización del funcionamiento de equipos de impulsión, permitiendo analizar también el ahorro económico que supondría la mejora en los equipos en función de las horas de llenado del depósito, y analizando distintos escenarios de funcionamiento de la bomba en función de la tarifa horaria contratada. La utilización de este tipo de herramientas es un aspecto fundamental en algunas instalaciones de redes urbanas, y repercute en el funcionamiento de la instalación, los costes de explotación y en la gestión de los recursos hídricos y energéticos en la red.

CONCLUSIONES

La medida de parámetros hidráulicos y eléctricos en las instalaciones de bombeo en redes de abastecimiento urbano es una actividad fundamental para controlar la eficiencia energética de estos equipos. Este aspecto se hace imprescindible en aquellas zonas con ausencia de asesoramiento técnico en el manejo de este tipo de instalaciones.

En este estudio, el análisis de la eficiencia energética en este tipo de instalaciones utilizando equipamiento especializado ha permitido detectar una baja eficiencia en el funcionamiento del equipo de impulsión.

El uso del programa Análisis de Sondeos (AS) facilita la interpretación de los parámetros hidráulicos y eléctricos adquiridos, permitiendo comparar el funcionamiento teórico y real de los equipos de impulsión. Asimismo, pretende servir de utilidad para el establecimiento de medidas correctoras en caso de averías en los equipos analizados.

Los resultados obtenidos mediante el programa AS permiten modelar el ahorro que se conseguiría si se trabajase en condiciones próximas a las de diseño de la impulsión en función del volumen de agua bombeado y el precio de la energía asociado a ese volumen.

La metodología propuesta pretende servir de ayuda a la toma de decisiones a los gestores de la red de abastecimiento, y como herramienta de ayuda para poder controlar la eficiencia de los equipos de impulsión.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) dentro del proyecto AGL2014-59747-C2-1-R(co-financiado por fondos FEDER). Los autores manifiestan su agradecimiento a los gestores de la zona de estudio por su colaboración.

REFERENCIAS

- Córcoles, J.I., de Juan, J.A., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A. 2010. Management evaluation of Water Users Associations using benchmarking techniques. *Agricultural Water Management* 98, 1-11.
- DOUE, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea nº L 327, Bruselas, Bélgica.
- INE, 2015. Instituto Nacional de Estadística de España. www.ine.es
- Johnson, A.L.; Benham, B.L.; Eisenhauer, D.E.; Hotchkiss, R.H. 2001. Ultrasonic water measurement in irrigation pipelines with disturbed flow. American Society of Agricultural Engineers. Trans. ASAE 44: 899-910.
- Moreno, M.A., Ortega, J.F., Córcoles, J.I., Martínez, M.A., Tarjuelo, J.M. 2010. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrigation Science* 28, 445-460.
- Spitzer, D.W. 1991. Flow Measurement. Practical Guides for Measurement and Control. Instrument Society of America. ISA, Chapel Hill, North Carolina, USA.