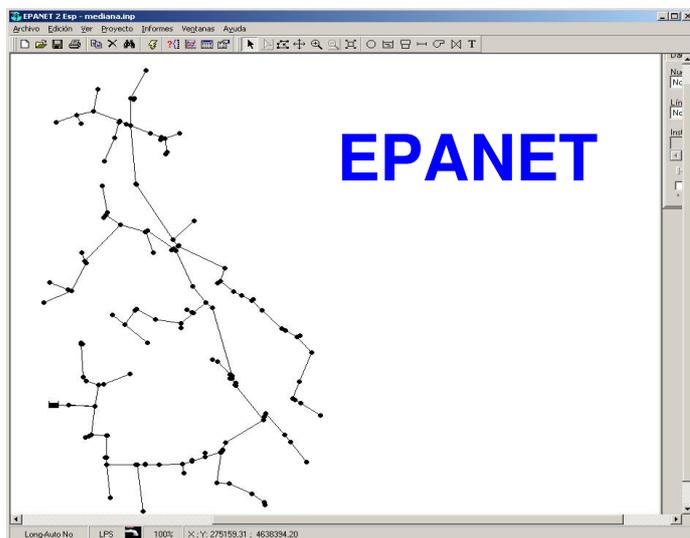
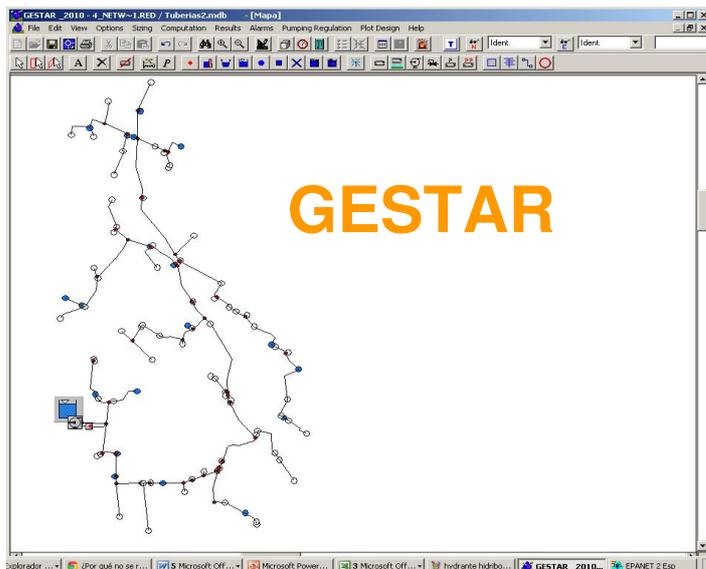


**NOTA TÉCNICA.**

# **¿ES EPANET2 UNA APLICACIÓN SUFICIENTE PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO- ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE RIEGO? COMPARATIVA CON GESTAR 2010**



**Equipo I+D+i GESTAR  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE HUESCA  
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (SPAIN)**

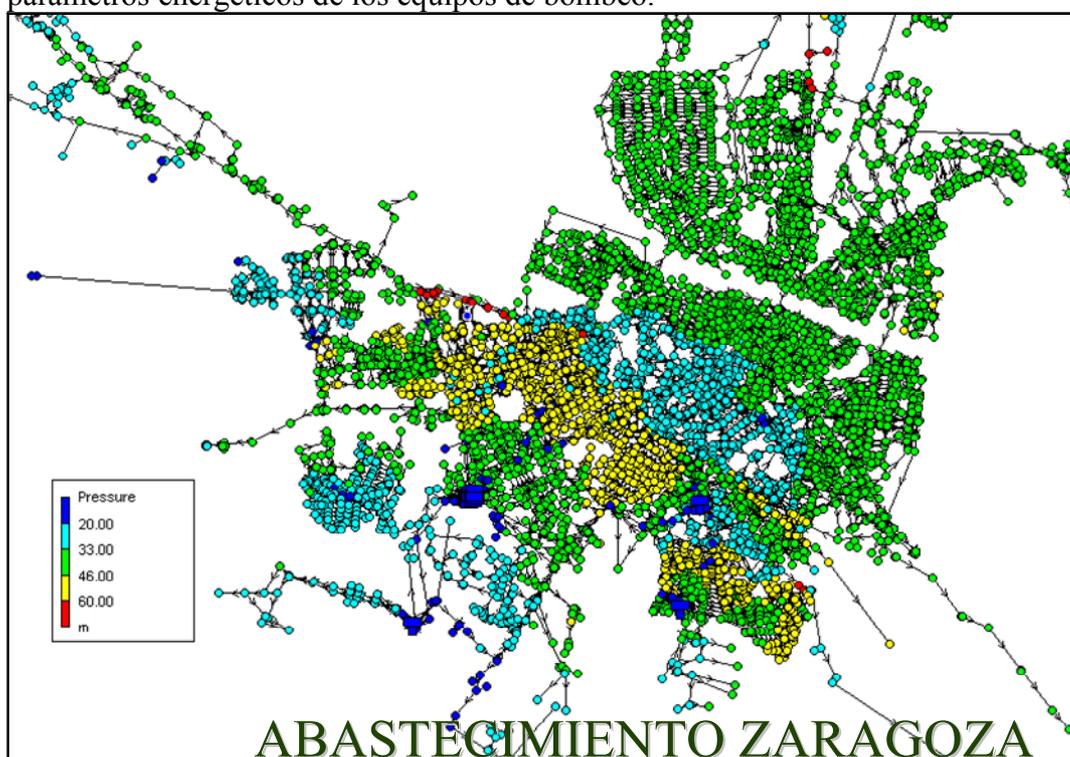
**ABRIL 2011**

## INTRODUCCIÓN

Como es sabido, EPANET es un excelente software, concebido en 1993 para la modelización de calidad de agua en redes de abastecimiento, que sobre un modelo hidrodinámico cuasi estacionario ejecuta un modelo de dispersión y reacción de especies químicas para determinar la concentración de contaminantes y desinfectantes en el agua de boca, lo que constituye el objetivo originario de la aplicación. A pesar de ello, ha sido utilizado frecuentemente en su faceta de analizador de redes hidráulicas exclusivamente. Su rapidez en la ejecución de análisis de redes de gran dimensión y su carácter público ha favorecido su amplia difusión.

Buena prueba de ello es el ejemplo de la Figura 1, en que se muestra el modelo completo de la red de abastecimiento de la ciudad de Zaragoza, que fue desarrollado por el equipo GESTAR en el año 1997, por encargo del Ayuntamiento de esta ciudad. Compuesto por 10.504 nodos, 13.600 tuberías, 15 depósitos y 12 grupos de bombeo, en su momento, fue uno de los modelos más grandes y completos desarrollados hasta la fecha mediante EPANET.

También encontramos aplicaciones de EPANET fuera de su contexto original, como es la modelización de redes de riego presurizadas, a pesar de las dificultades de aplicación directa de los recursos de EPANET a este contexto y, en particular, en el intento de evaluación de aspectos energéticos, extremo que no constituye su punto fuerte dadas sus limitaciones nativas. Por ejemplo, no permite modelizar convenientemente las estaciones de bombeo directo con variación de velocidad para seguir curvas de consigna, ni facilita valorar directamente las posibles mejoras en la composición y regulación de las mismas al suministrar meramente valores agregados y medios de los parámetros energéticos de los equipos de bombeo.



**FIGURA 1.** Modelo hidrodinámico EPANET de la red de tuberías completa del abastecimiento de agua de la ciudad de Zaragoza. Equipo GESTAR (Aliod et al, 1998)

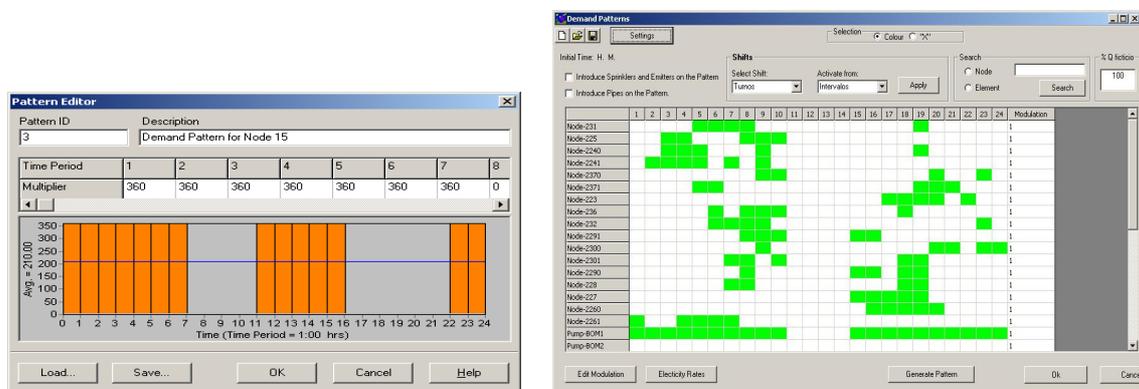
Aprovechando la dilatada experiencia que el grupo I+D+i GESTAR dispone como usuarios de EPANET desde sus orígenes, y el dominio de la aplicación GESTAR como desarrolladores de la misma, en este documento se revisan las limitaciones de EPANET2 (Rossman, 2000) en su aplicación a la modelización de sistemas de riego, especialmente en aquellos que disponen de bombes directos.

Se comparan las herramientas EPANET2 con las que aporta la plataforma integral GESTAR 2010, específicamente concebida para sistemas de riego, y en la que se han implementado recursos diseñados a tal efecto, con el objeto precisamente de superar las limitaciones de EPANET. Recursos que además integran los resultados más relevantes de las actividades de I+D+i publicadas en ámbitos nacionales e intencionales, tanto propias como de terceros.

Todo ello suministra nuevas herramientas de análisis, de fácil uso para el usuario medio (que no desea tener que reprogramar personalmente las herramientas de cálculo existentes para adaptarlas a sus necesidades) y aporta una información directa y precisa de los aspectos hidráulicos y energéticos de interés para el diseño, gestión y auditoria de riegos a presión.

## DIFICULTAD PARA CONFIGURACIÓN DE PATRONES DE DEMANDA EN HIDRANTES

En el contexto de redes colectivas de riego, EPANET adolece de facilidades para generar escenarios de demanda en periodo extendido, dado que hay que definir tantos patrones de modulación como hidrantes existen en la red (Figura 2.A), lo que puede requerir varias horas para configurar una sola simulación con los recursos nativos. En GESTAR, a través de un cuadrante de programación manual “point and drag”, o mediante lectura de base de datos, se puede introducir directamente la tabla de programaciones (Patrones en el argot de EPANET) de riego de cada hidrante (Figura 2.B). Además, en GESTAR, en base a una metodología de tipo aleatorio (Moreno et al, 2007), existe la opción de generar automáticamente escenarios de demanda en todos los hidrantes para un determinado lapso temporal, en función de las necesidades hídricas del periodo. En el caso de riego a turnos, la programación (Patrón) se genera automáticamente.

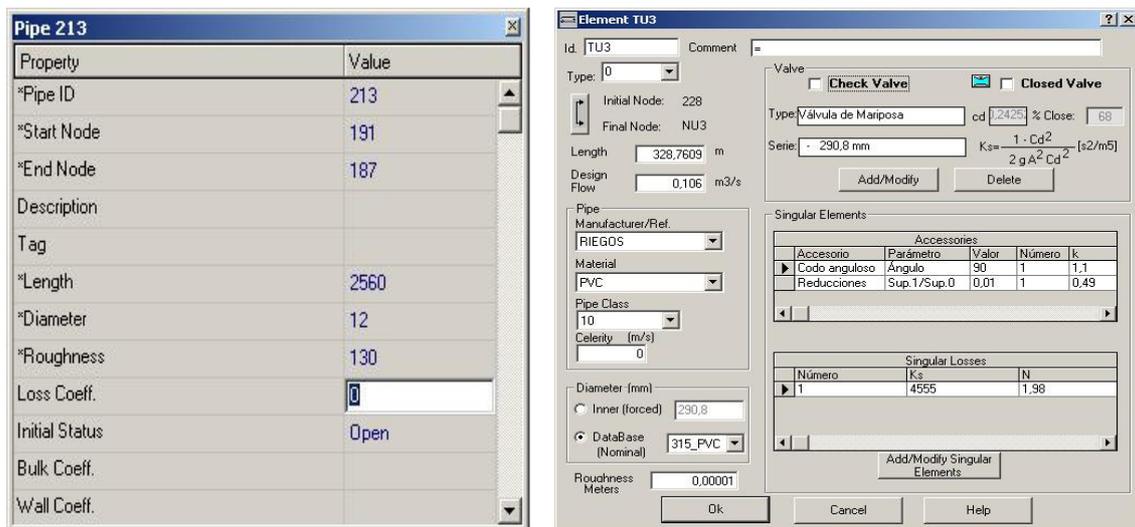


**FIGURA 2. A** (Izda) Configuración individual del Patrón de consumo de un hidrante en EPANET. **FIGURA 2. B** (Dcha) configuración de la programación conjunta de todos los hidrantes de la red GESTAR.

## CARENCIA DE BASES DE DATOS

Dada la inexistencia en EPANET2 del respaldo de bases de datos de componentes para soporte de la generación de modelos y propuesta ágil de alternativas, deben consultarse externamente e introducirse de forma manual todos los valores dimensionales (p.e. diámetros interiores de conducciones, Figura 3.A), tablas (p.e. curvas características de bombas) y coeficientes (p.e. de pérdidas de carga singulares).

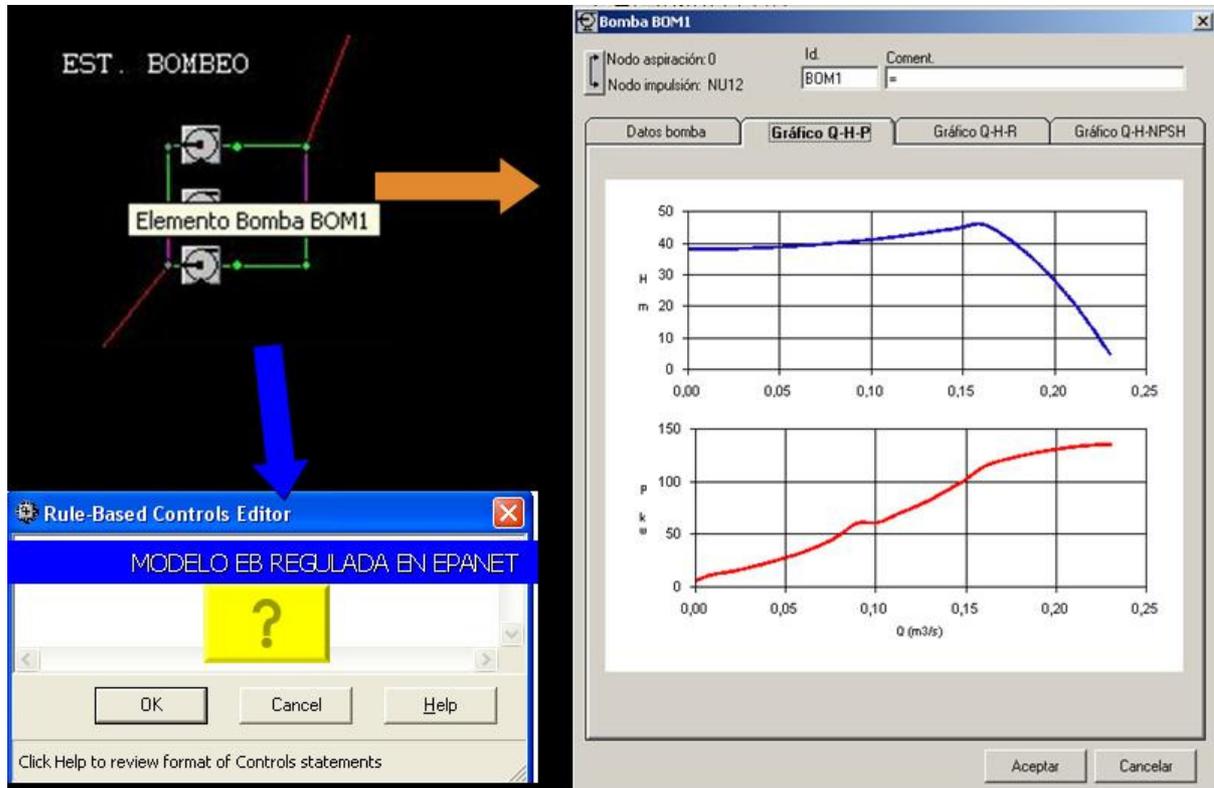
GESTAR dispone de bases de datos con registros que se invocan desde las fichas de definición de componentes (ver ejemplo en Figura 3.B), editables por el usuario, para todo tipo de componentes (conducciones, pérdidas singulares, válvulas de estrangulamiento, válvulas de regulación, bombas, emisores) así como para tarifas de energía y potencia contratada, configuración de alarmas, programación de riegos, órdenes de control tipo PLCs, logout de alarmas, etc. Además, en GESTAR, actualmente todos los ficheros I/O pueden ser configurados en formato base de datos ACCESS, facilitando el pre y post proceso de la información y la comunicación con todo tipo de sistemas GIS, CAD y aplicaciones de terceros.



**FIGURA 3. A (Izda).** Ventana mixta de definición de datos y consulta de resultados de una conducción en EPANET2. **FIGURA 2. B (Dcha)** Ventana de definición de una conducción en GESTAR, con carga desde base de datos de diámetro interior, en función de Fabricante, Material, Timbraje, y DN seleccionado, carga de coeficiente de pérdidas singulares de válvulas, en función de Tipo y Grado de Cierre, y carga de coeficiente de pérdidas singulares de Accesorios Normalizados o Genéricos (p.e. filtros).

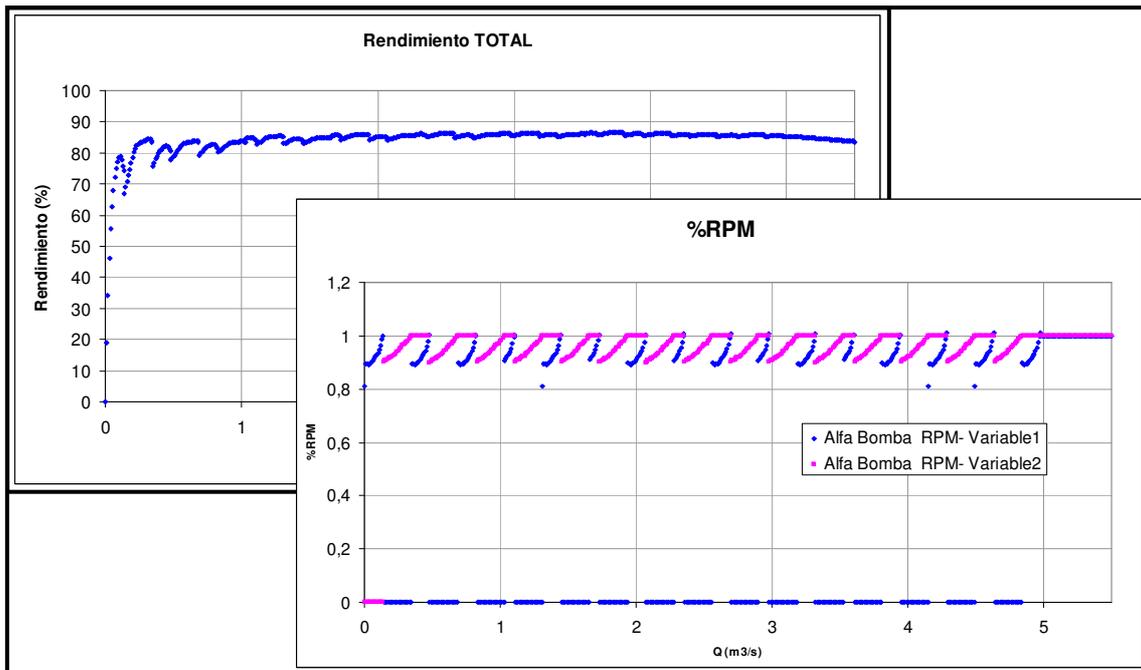


Sin embargo, en GESTAR esta modelización se realiza de forma sistemática, sencilla y compacta, mediante la definición de una bomba virtual cuyas curvas características (que modelizan el conjunto de la estación de bombeo y su regulación) corresponden a las curvas conjuntas de operación (altura útil suministrada, potencia y rendimiento conjunto) de la estación de bombeo, Figura 5.



**FIGURA 5.** Modelización compacta en GESTAR (Dcha) de Estaciones Bombeo Directo con seguimiento de curva de consigna mediante variador(es) de velocidad con cualquier composición y tipo de regulación. En EPANET2 no es posible.

Además, mediante el *Módulo Regulación de Estaciones de Bombeo* que GESTAR incorpora desde principios de 2008, pueden obtenerse fácilmente estas curvas conjuntas, (como por ejemplo, las mostradas en la Figura 5 (Dcha)) para cualquier orden de complejidad de la regulación (por ejemplo Figura 6 (Arriba)), así como todos los parámetros hidráulicos de cada uno de los grupos individuales de la composición de la estación de bombeo (potencia, rendimiento, RPM) en función de caudal. Y esto para cualquier composición, con fraccionamiento, tipo y tamaño de bombas arbitrarios, y regulación con uno o más variadores de frecuencia. En la Figura 6 se muestran los resultados de la aplicación de la herramienta a un caso real (con 5 grupos de 500 kW, 4 grupos de 250 kW de velocidad fija y dos grupos de velocidad variable, de 250 y 160 kW) cuya secuencia de regulación, y la correspondiente implementación en GESTAR, se visualiza en el Anexo II. Si se desea, pueden utilizarse las curvas características de equipos individuales cargadas en la bases de datos de equipos de bombeo.



**FIGURA 6.** (Arriba) Rendimiento conjunto de una estación de bombeo compuesta por 11 bombas: 5 grupos de 500 kW, 4 grupos de 250 kW de velocidad fija y dos grupos de velocidad variable, de 250 y 160 kW. (Abajo) RPM de los grupos de velocidad variable en la regulación anterior con dos variadores operando simultáneamente hasta un caudal máximo conjunto de 5.000 l/s. Composición y resultados encontrados con GESTAR (ver Anexo II).

Se dispone adicionalmente de una herramienta para generar curvas de consigna específica de redes de riego, definidas como un cierto percentil de satisfacción de requisitos de presión en los hidrantes al simular cientos o miles de escenarios de demanda para cada % de caudal en cabecera.

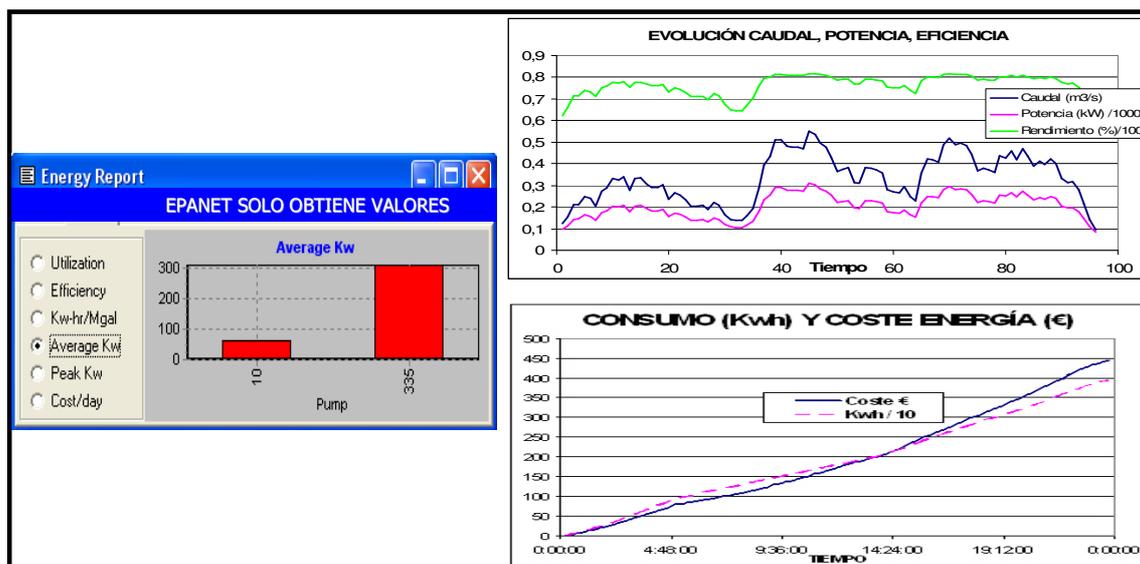
## CARENCIA DE INFORMACIÓN SOBRE PARÁMETROS ENERGÉTICOS

EPANET2 no muestra ninguna información que permita discernir el comportamiento instantáneo de los parámetros energéticos de los equipos de bombeo, ya que no suministra la evolución temporal de variables críticas, como es el rendimiento o la potencia consumida, aspecto esencial a la hora de identificar el origen de disfunciones y evaluar realísticamente el impacto de modificaciones y posibles mejoras. Sólo informa, en un sucinto reporte final, acerca de los consumos netos totales de energía, rendimientos medios y consumos punta habidos en el periodo simulado, para cada bomba, (Figura 7 A). Salvo en casos sencillos, compuestos únicamente de elevaciones entre balsas de nivel prácticamente constante y sin variadores, para que el rendimiento también lo sea, estos recursos son manifiestamente insuficientes para disponer de resultados energéticos completos y con capacidad analítica.

GESTAR supera estas limitaciones calculando y mostrando en cada instante el conjunto completo de las variables de índole energética, valores de *Potencia Absorbida* y *Rendimiento*, que se evalúan para cada grupo de bombeo (real o virtual) individualmente, y para el conjunto de todas las estaciones de bombeo (Figura 7. B).

Además, en función de los valores instantáneos de *Potencia Absorbida*, GESTAR computa el valor acumulado de la *Energía Neta Consumida* conforme transcurre el tiempo, junto al importe económico correspondiente (Figura 7. B), según las tarifas de energía y potencia contratada que se hayan seleccionado, discriminadas en intervalos horarios. Una utilidad adicional permite al usuario introducir fácilmente tantas tarifas contratadas (o en curso de negociación) de los términos de energía y potencia como se desee, con total flexibilidad y generalidad.

Todos estos recursos permiten la rápida identificación del origen de las disfunciones e ineficiencias y la valoración racional de propuesta de alternativas. Las alarmas opcionales identifican y facilitan la tarea y permiten incluso evaluar las penalizaciones por exceso de consumo de potencia, respecto a la contratada, en cada momento.



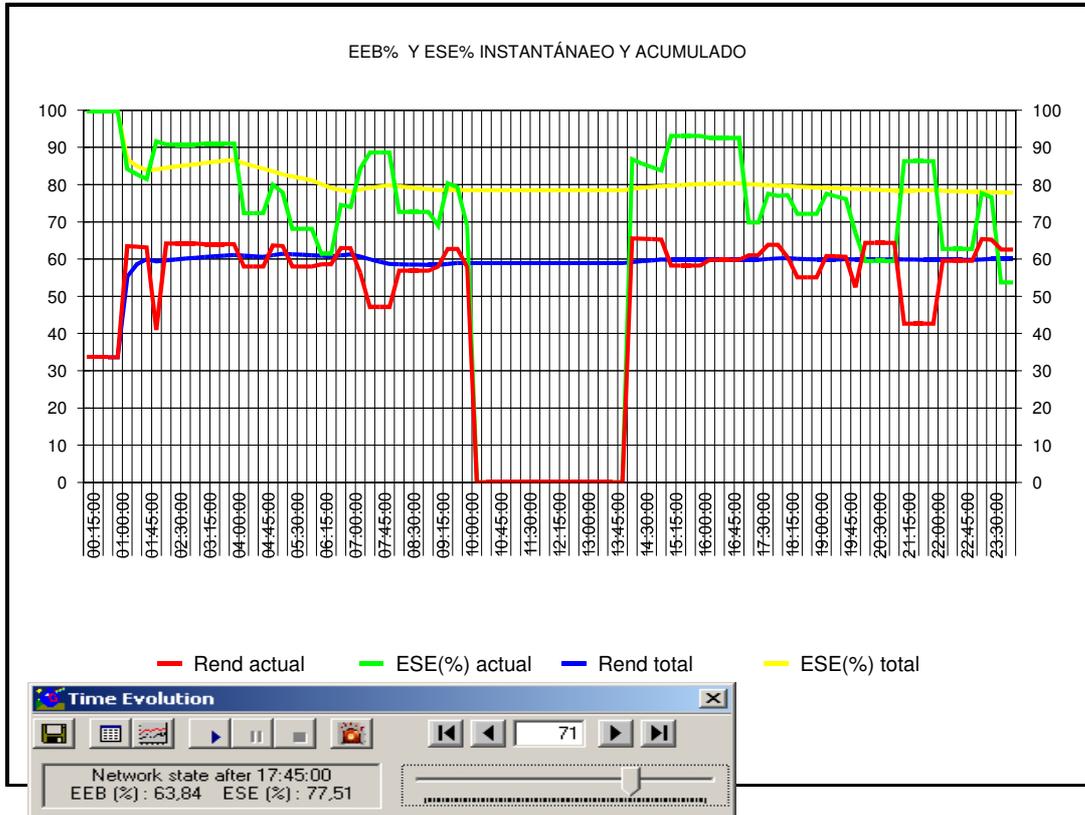
**FIGURA 7. A** (Izda) EPANET2 solo muestra valores medios de consumo de energía, coste acumulado y pico de potencia en el periodo simulado de cada grupo de bombeo. **FIGURA 7. B** (Dcha) GESTAR evalúa y muestra: tanto valores instantáneos (potencia consumida y rendimiento), como acumulados hasta cada instante (energía consumida), desglosados por equipo de bombeo y totales. El coste acumulado, de los términos de energía y potencia según las tarifas introducidas, es evaluado de forma continua.

## CÁLCULO DIRECTO DE LOS PARÁMETRO DE EFICACIA ENERGÉTICA *EEB* y *ESE*

Los parámetros esenciales para la caracterización de eficacia energética definidos por el IDAE (2008), *EEB* (Eficiencia Energética de Bombeo) y *ESE* (Eficiencia de Suministro Energético), son evaluados en GESTAR mediante procedimientos de simulación que habilitan el análisis detallado de sistemas complejos, como aquellos que contienen Estaciones de Bombeo Directo (EBD), donde la altura de impulsión (a través de la curva de consigna) es variable así como el rendimiento de la EBD. Alternativamente *EEB* (que equivale al Rendimiento conjunto de la estaciones de bombeo) puede evaluarse para la campaña de riego completa mediante aproximaciones estadísticas.

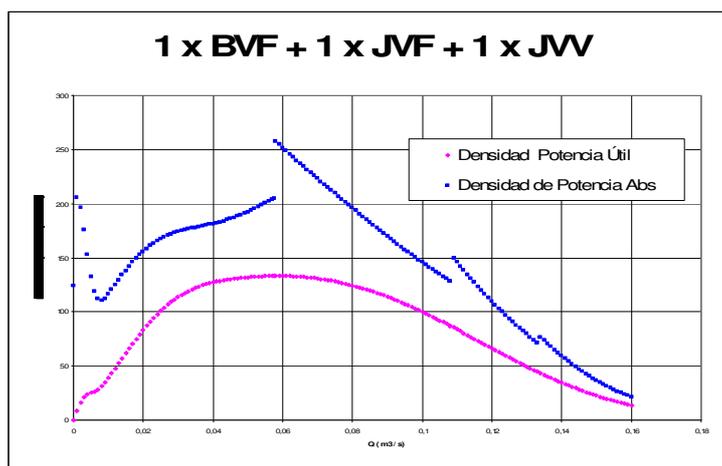
El procedimiento de evaluación de *EEB* y *ESE* mediante simulación, válido para cualquier tipo de red, calcula *EEB* y *ESE* directamente, suministrando los valores “actuales” (computados con el volumen trasegado instantáneamente en cada intervalo

temporal) y “totales” (calculados con el volumen total servido hasta cada instante del periodo simulado), (FIGURA 8). Dado que la altura de impulsión en EBD depende del caudal, a través de la curva de consigna, se introducen generalizaciones y adaptaciones, recogidas en el Anexo I, respecto a las definiciones originales (Abadía et al, 2008) IDAE (2008) que utilizaron valores medios constantes para las alturas de impulsión de las estaciones de bombeo.



**FIGURA 8** Gráficos de EEB % (Rendimiento del conjunto de estaciones de bombeo) y ESE % generados por GESTAR. Valores actuales (considerando el caudal instantáneo) y totales (considerando el volumen servido hasta el instante).

Mediante el cómputo de las funciones de densidad de probabilidad del caudal en cabecera de redes ramificadas a la demanda, inspirado en (Roldán et al, 2003), GESTAR calcula las densidades de probabilidad de energía útil y consumida en la EBD, que permiten visualizar las distribuciones probabilidad de ambas variables en función del régimen de caudal (FIGURA 9) y calcular, mediante integración, la resultante *EEB* que considera así todos los regímenes de la campaña de riego, ponderados por su probabilidad de ocurrencia.



**FIGURA 9** Distribución de probabilidad de energía consumida y energía útil en función del caudal circulante en cabecera a lo largo de la campaña de riego, para una red ramificada.

Ambas técnicas aportan la capacidad predictiva del comportamiento de cada grupo en todos los regímenes, lo que se convierte en una poderosa herramienta de valoración de nuevos proyectos y de las instalaciones existentes. Estos recursos junto a la medida en campo de la potencia consumida para diversos caudales, actividad contenida en los protocolos de auditoría del IDAE, permiten discriminar el origen de las ineficiencias energéticas, distinguiendo entre causas “intrínsecas” (debida a la composición y regulación de las EBD) de aquellas que son de tipo “operativo” (debidas a falta de rendimiento de los equipos por desgates, mal mantenimiento, cavitación, pérdidas mecánicas, etc.) lo que ayuda a definir las propuestas de mejoras, que constituyen el aspecto trascendental de los procesos de auditoría y gestión cotidiana.

Lógicamente, EPANET2, que fue desarrollado al margen de estas necesidades, no dispone de recursos para computar tales parámetros.

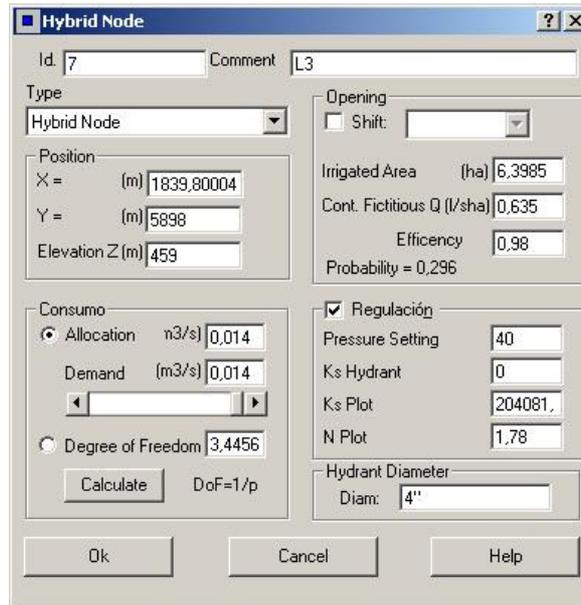
### **INCAPACIDAD DE MODELAR HIDRANTES DE RIEGO EN CONDICIONES DE BAJA PRESIÓN Y EMISORES DE DISTINTO COMPORTAMIENTO.**

Otros aspectos limitan EPANET2 en tareas de modelización realista de sistemas de riego en todo tipo de escenarios, especialmente las condiciones de sobre explotación que pueden darse en la gestión cotidiana. Así, el comportamiento híbrido de los hidrantes de riego, que suministran caudal constante o modulado según la demanda establecida, independiente de la presión cuando la presión en la red supera la presión de consigna, pero que suministran caudal dependiente de la presión cuando la presión desciende por debajo del umbral de consigna, no pueden contemplarse directamente en EPANET2.

En GESTAR este comportamiento híbrido se reproduce mediante el tipo de nodo específico *Hidrante Regulador* (ver Figura 10), que opera bajo respuestas del tipo:

$$Q \approx \text{Demanda}, \text{ si } H \geq H_{\text{consigna}}$$

$$Q \approx \left( \frac{H}{K_s} \right)^{\frac{1}{N}}, \text{ si } H \leq H_{\text{consigna}}$$



**FIGURA 10.** Ventana de Definición de nodo Hidrante Regulador. Si la presión se encuentra por encima de la consigna, el consumo será igual al valor Demanda, constante e independiente de la presión. Si la presión en la red se encuentra por debajo de la presión de consigna, el consumo será dependiente de la presión.

En EPANET, a partir de la versión 2, pueden definirse emisores con ecuaciones de comportamiento equivalentes a

$$Q \approx \left( \frac{H}{K_s} \right)^{\frac{1}{N}}, H > 0$$

Si bien el coeficiente

$$C \approx \left( \frac{1}{K_s} \right)^{\frac{1}{N}}$$

puede definirse para cada emisor, el exponente (1/N) de la ecuación de comportamiento es único para todos los emisores de la red, lo que limita la modelización de diversos tipo de emisores en una misma red..

En GESTAR las características  $K_s$  y  $N$  de los emisores pueden ser definidas de forma independiente para cada emisor, y ajustadas automáticamente con los valores las cartas de respuesta presión-caudal dadas por fabricantes, en caso de estos emisores modelasen aspersores (Figura 11), si bien este extremo corresponde a aspectos relacionados con la hidráulica de parcela, que no es objeto de este informe.

Emisor EMS1

Id: EMS1 Comentarios: # Turno: Turnos

Emisor

Posición  
X = 606884,75  
Y = 699986,81  
Cota Z = 0 m

Origen NU3  
Longitud: 3 m

Fabricante Pioggia\_Carnevali Tipo de Emisor FENNEC INV-3.5

P (Atm)	Q (l/seg)	Alcance (m)	Pluv-C (r)
2	0,18	11,7	2,8
2,5	0,2	12	3,2
3	0,22	12,1	3,5

Presión-Caudal  
Ks: 145980 N: 1,82934 Qn (l/s) 0,22

Alcance-Presión  
Ks: 7,33 N: 0,148 Alcance (m) 12

Tubería

Tubería Fabricante/Refs RIEGOS Material PVC Timbraje 10

Diámetro (mm) Forzado (interior) 129,2 Base Datos 140\_PVC Nominal

Válvula Retención  Válvula cerrada Tipo: Ninguna Cd: % cierre: Serie: Ninguna  $K_{s2} = \frac{1 - Cd^2}{2gA^2Cd^2}$  (s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)

Existen Accesorios y/o Pérdidas Rugosidad (Metros) 0,00001

Aceptar Cancelar Ayuda

**FIGURA 11.** Ventana de Definición de Emisor. Los coeficientes  $K_s$  y  $N$  de la respuesta caudal vs presión y alcance vs presión se ajustará automáticamente con los datos de fabricante cargados en la base de datos

## OTROS ASPECTOS

Finalmente, en la literatura (Estrada et al., 2009) se recogen algunos problemas computacionales, de importancia menor, relativos a la falta de convergencia en casos de conducciones de baja resistencia y múltiples válvulas reguladoras, para los que GESTAR incorporó soluciones numéricas desde sus orígenes (Aliod et al. 1998).

Esta mayor robustez y sobre todo, la disponibilidad de nuevos recursos, como por ejemplo las herramientas de análisis inverso (Aliod y González, 2007), conduce finalmente a cambios adicionales en la estructura y dimensión de los sistemas de ecuaciones no lineales resueltos en el motor original de simulación de GESTAR, que precisa el concurso de técnicas numéricas especializadas para el almacenamiento compacto, inversión y operaciones algebraicas de matrices no simétricas. Tales procedimientos, si bien implican mayores tiempos de cálculo, comparados con el *Método del Gradiente*, de carácter simétrico, implementado en EPANET2, no suponen ninguna desventaja en la práctica, dado que la capacidad de las CPU actuales excede, de lejos, las prestaciones necesarias para disponer de una respuesta inmediata, incluso en los mayores sistemas de riego encontrados. En cualquier caso, siempre cabe la opción de desactivarlos para acelerar la simulación en periodo extendido si así se desea.

Las primeras versiones de EPANET datan de 1993, con una compilación última que se mantuvo en la versión 1.1e hasta finales de los años 90. En el año 2000 apareció la versión 2, sobre la que no ha habido posteriormente incremento de funcionalidades significativas, salvo recompilaciones con actualizaciones menores, habiéndose quedado en algunos extremos desfasados en cuanto entorno de programación, limitación de recursos operativos, etc. Se ha anunciado una futura versión EPANET3 en la que se

espera se corregirán algunas de las carencias y limitaciones enumeradas, pero no se dispone de fecha todavía de aparición y, al parecer, en la misma se congelarán los desarrollos, de manera que no se esperan mejoras ulteriores.

GESTAR se encuentra hasta la fecha en un proceso de constante evolución, adaptación a las necesidades de cada momento e incorporando nuevos recursos y extensiones de capacidades, que le permite no sólo encontrarse permanentemente actualizado, si no anticipar muchas de las necesidades previsibles. En la el Anexo III parece una comparativa de las prestaciones GESTAR con EPANET y con DIOPRAM (un software en formato hoja de cálculo que aporta funcionalidades exclusivamente de dimensionado óptimo económico de redes ramificadas), donde se aprecia una abrumadora ventaja en capacidad y prestaciones frente a ambas.

Para ello, GESTAR cuenta con un equipo multidisciplinar que no sólo se dedica al necesario trabajo de mantenimiento para evitar su obsolescencia (compatibilidad con nuevos S.O. Windows, con versiones Office, AutoCad, etc.) si no que mantiene vivo el desarrollo de la aplicación y activa la difusión de la misma a través de la página web [www.gestarcad.com](http://www.gestarcad.com).

Si bien en un principio los costes asociados a estas tareas fueron asumidos en buena parte por el Departamento de Agricultura del Gobierno de Aragón, que dio un fuerte impulso a los desarrollos iniciales, complementados con financiación adicional de proyectos de I+D y trabajos de consultoría del propio grupo, en la actualidad el soporte de la aplicación debe autofinanciarse, por lo que desde el año 2008 se ha introducido un esquema de difusión, en que coexisten la filosofía inicial de distribución gratuita de la aplicación, en su versión PROFESIONAL (y EDUCATIVA), suficiente para proyectos de mediana magnitud, que podemos encontrar tanto en nuestro país como en países en vías de desarrollo, con las versiones completas, PREMIUM, que requieren de pago para la transferencia de licencias, que se destinan a financiar el mantenimiento de la aplicación en sí y soportan la existencia de las versiones gratuitas, EDUCATIVA Y PROFESIONAL.

## REFERENCIAS

ABADÍA, A.; ROCAMORA, C. ; RUIZ, A.; PUERTO, H. (2008). *Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory*. Biosystems Engineering 101 (2008) 21-27.

ALIOD, R.; ANGULO, B.; HATDZIJUKOVIC, H. (1998) *Primeros Resultados de la Implementación de un Modelo de Simulación para la red de Abastecimiento de la Ciudad de Zaragoza*. I Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Zaragoza

ALIOD, R., EIZAGUERRI, A.; ESTRADA, C. (1998). “*Development and validation of hydraulic modelling tools for pressurised irrigation networks*”. Hydroinformatics '98. Vladan Babovic & Lars Christian Larsen, Danish. Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark, 545-552.

ALIOD, R & GONZÁLEZ, C. (2007): “*A computer model for pipe flow irrigation problems*”. Numerical modelling of hydrodynamics for water resources – García-Navarro & Playán (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44056-1.

ESTRADA, C.; GONZÁLEZ, C.; ALIOD, R.; PAÑO J. (2009): “*Improved Pressurized Pipe Network Hydraulic Solver for Applications in Irrigation Systems*” *J. of Irrigation and Drainage Engng*, Vol. 135, No. 4, August 1, 2009

MORENO, M.A.; PLANELLS, P.; ORTEGA J.F., TARJUELO, J. (2007): *New Methodology to Evaluate Flow Rates in On-Demand Irrigation Networks. J. of Irrigation and Drainage Engng*, Vol. 133, No. 4, August 1, 2007

ROLDÁN, J.; PULIDO-CALVO, I.; LÓPEZ-LUQUE, R.; ESTRADA, J.C.G.;. (2003) *Water Delivery System Planning, considering irrigation simultaneity. ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol 129, n°4, pp 247-255

ROSSMAN, L. (2000). *Epanet 2 User's Manual. Cincinnati, USA: Environmental Protection Agency.*

## ANEXO I

### CÓMPUTO DE INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EEB Y ESE EN GESTAR

- **Eficiencia Energética de Bombeo (EEB):** Cociente entre la energía útil y la energía invertida en el dispositivo de bombeo (Rendimiento de las estaciones de bombeo en su conjunto). Esto es, el cociente entre la energía suministrada a la red por los bombes (potencia útil de las Estaciones de Bombeo) y la energía eléctrica absorbida por el conjunto de Estaciones de Bombeo.

#### EEB actual, para el instante $j$ :

$$EEB_j(\%) = \frac{\rho g \cdot \sum_i^{NB} (Q_{ij} \cdot \Delta H_{ij})}{\sum_i^{NB} P_{ij}} \cdot 100$$

Donde:

$NB$  es el número de bombas que componen la estación de bombeo.

$P_{ij}$  es la Potencia consumida por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $W$ .

$Q_{ij}$  es el caudal consumido por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $m^3/s$ .

$\Delta H_{ij}$  es la altura impulsada por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $m^3/s$ .

**EEB acumulado en el instante  $T$**  (cociente entre el sumatorio de la energía útil suministrada por las bombas que componen todas las estaciones de bombeo desde el instante cero al instante  $T$ , y el sumatorio de la energía eléctrica consumida por las estaciones de bombeo desde el instante 0 al instante  $T$ ):

$$EEB_T(\%) = \frac{\rho g \cdot \sum_j^T \left( \sum_i^{NB} (Q_{ij} \cdot \Delta H_{ij}) \right)}{\sum_j^T \left( \sum_i^{NB} P_{ij} \right)} \cdot 100$$

Donde:

$NB$  es el número de bombas que componen la estación de bombeo.

$P_{ij}$  es la Potencia consumida por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $W$ .

$Q_{ij}$  es el caudal consumido por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $m^3/s$ .

$\Delta H_{ij}$  es la altura impulsada por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $m^3/s$ .

- **Eficiencia de Suministro Energético (ESE):** Cociente entre la energía mínima necesaria a aportar al sistema y la energía útil aportada.

Energía mínima necesaria se define como la diferencia entre la suma de la energía demandada por todos los hidrantes menos la energía disponible en los elementos de cabecera (entrada de agua al sistema).

**ESE actual, para el instante  $j$ :**

$$ESE_j(\%) = \frac{\sum_i^{NH} (\rho g \cdot Q_{ij} \cdot (z_i + P_{consigna_i})) - \sum_i^{NC} (\rho g \cdot Q_{ij} \cdot P_{cabecera_{ij}})}{\rho g \cdot \sum_i^{NB} (Q_{ij} \cdot \Delta H_{ij})} \cdot 100$$

Donde:

$NB$  es el número de bombas que componen la estación de bombeo.

$NH$  es el número de hidrantes que componen la red de riego.

$NC$  es el número de elementos de cabecera que componen la red de riego.

$P_{consigna_i}$  es la presión de consigna del hidrante  $i$  ( $m$ ) (supuesta constante a lo largo del tiempo)

$P_{cabecera_{ij}}$  es la presión en cabecera del elemento  $i$  en el instante  $j$

$Q_{ij}$  es el caudal consumido/suministrado por el elemento  $i$  en el instante  $j$  ( $m^3/s$ ).

$\Delta H_{ij}$  es la altura impulsada por la bomba  $i$  en el instante  $j$  en  $m^3/s$ .

**ESE acumulado, para el instante  $T$ :**

$$ESE_T(\%) = \frac{\sum_j^T \sum_i^{NH} (\rho g \cdot Q_{ij} \cdot (z_i + P_{consigna_i})) - \sum_j^T \sum_i^{NC} (\rho g \cdot Q_{ij} \cdot P_{cabecera_{ij}})}{\sum_j^T \sum_i^{NB} \rho g \cdot (Q_{ij} \cdot \Delta H_{ij})} \cdot 100$$

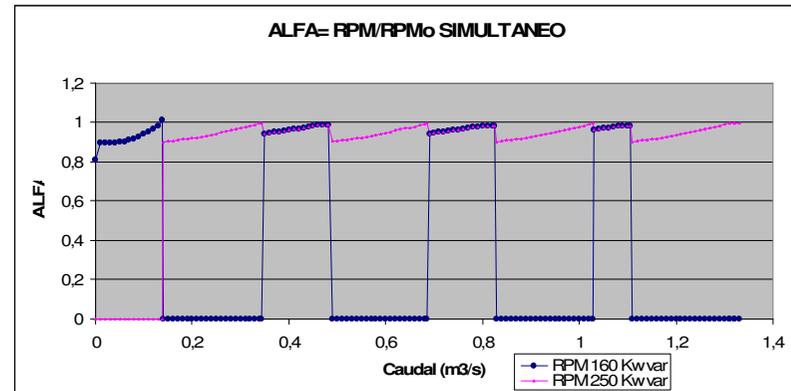
## ANEXO II

# EJEMPLO EN GESTAR DE COMPOSICIÓN Y REGULACIÓN COMPLEJA DE UNA EBD CON 11 BOMBAS (5 de 500 kW, 5 de 250 kW, 1 de 160 kW) y 2 VARIADORES DE FRECUENCIA.

### CUADRANTE DE REGULACIÓN PROPUESTA

Nº Conjunto	Variador 160 KW	Variador 250 KW	Bomba 250 KW	Bomba 500 KW
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	1	1	0	0
4	0	1	1	0
5	1	1	1	0
6	0	1	2	0
7	1	1	0	1
8	0	1	1	1
9	1	1	1	1
10	0	1	2	1
11	1	1	0	2
12	0	1	1	2
13	1	1	1	2
14	0	1	2	2
15	1	1	0	3
16	0	1	1	3
17	1	1	1	3
18	0	1	2	3
19	1	1	0	4
20	0	1	1	4
21	1	1	1	4
22	0	1	2	4
23	1	1	0	5
24	0	1	1	5
25	1	1	1	5
26	0	1	2	5
27	1	1	3	5
28	0	1	4	5
29	1	1	4	5

### RESULTADOS GESTAR DE EVOLUCIÓN RPM DE LAS BOMBAS CON VARIADOR DE FRECUENCIA



### TABLA DE IMPLEMENTACIÓN DE SECUENCIA DE REGULACIÓN EN GESTAR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
250-F1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
250-F2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1
500 F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500 F4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500 F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
500 F1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500 F2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
160 V	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
250 V	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

## **ANEXO III**

**COMPARATIVA DE PRESTACIONES GESTAR 2010 vs  
EPANET2 Y DIOPRAM3**

