

Análisis comparativo de recuperación energética de bombas trabajando como turbinas considerando rendimiento fijo y variable. Caso de estudio Vallada (Valencia)

Pérez-Sánchez, Modesto^{a1}, López-Jiménez, P. Amparo^{a2*}

^a Departamento Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera S/N. 46022 Valencia.

Email: ^{a1}mopesan1@upv.es (Doctorando)

Email: ^{a2}palopez@upv.es (* autor de correspondencia)

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

El presente trabajo analiza la variación de la energía recuperada por una bomba trabajando como turbina considerando o no el rendimiento variable en la misma. El objetivo es mostrar la importancia de considerar los valores de caudal, altura recuperada y eficiencia en función del tiempo cuando se desarrollan estudios de mejora de eficiencia en una red de distribución. El trabajo presenta una metodología para llevar dicha comparación, aplicándola a una red de riego localizado. El análisis de tres casos de estudio ha puesto de manifiesto la diferencia de valores de energía recuperada que existe si el rendimiento es considerado variable o fijo, con reducciones de energía recuperada de hasta el 78.41%, cuando la eficiencia es variable. Por tanto, la implementación de las curvas Q-H y Q- η a lo largo del tiempo por parte de los gestores de sistemas de distribución es necesaria en los modelos de desarrollados para su explotación.

INTRODUCCIÓN

El uso de las energías renovables en la sociedad actual está empujando a un avance continuo como consecuencia de la mejora en los criterios de sostenibilidad marcados por la legislación Europea. Dentro de los parámetros de sostenibilidad, los índices energéticos (*e.g.*, huella energética del agua, eficiencia energética de la red, energía disipada) son fundamentales. Estos tienen una repercusión muy importante en el buen devenir del resultado alcanzado en el nexo agua-energía por los gestores de los sistemas hidráulicos. La búsqueda de la mejora energética no sólo está implantando el desarrollo de las auditorías energéticas en redes de distribución de presión (Cabrera et al., 2010). La realización de recientes estudios teóricos y ensayos en plantas piloto están proponiendo la sustitución de las válvulas reductoras de presión (*VRP*) por maquinaria hidráulica de recuperación, la cual aprovecha la energía disipada por las válvulas de regulación.

Dentro de la disponibilidad de los tipos de maquinaria hidráulica de recuperación, diferentes investigadores han mostrado la gran adaptabilidad, correcto funcionamiento y viabilidad económica que presentan las bombas trabajando como turbinas (*PATs*, en adelante, por las siglas de la nomenclatura “pump as turbines”), (Ramos y Borga, 1999; Carravetta et al., 2014). No obstante, previo al análisis de energía recuperable, es necesario conocer la distribución de caudales y alturas máximas en aquellas localizaciones candidatas a recibir una *PAT*. En algunos casos, estos estudios se desarrollan considerando los caudales medios de funcionamiento (Sitzenfrei y von Leon, 2014) o bien, a través de metodologías calibradas que estiman valores de caudal y altura máxima recuperable en función de los parámetros de los nudos de la red (Pérez-Sánchez et al., 2016; 2017).

El análisis de estos sistemas conduce al desarrollo de metodologías de optimización (*e.g.*, ‘*simulated annealing*’), en los cuales, se maximiza la energía recuperable del sistema en función del número de turbinas y su localización (Samora et al., 2016; Pérez-Sánchez 2017). Por tanto, una correcta determinación del valor de energía recuperable es crucial para garantizar el éxito

en estas estrategias y su posterior análisis de viabilidad económica. La energía recuperada por una máquina hidráulica viene establecida por el caudal y altura recuperada en un punto de funcionamiento como turbina, así como por el rendimiento que tiene la máquina en ese punto. El desconocimiento a priori de estos valores de rendimiento, dificulta el análisis de la recuperación teórica, y en la mayoría de los casos se opta por un análisis considerando un rendimiento constante, a sabiendas de que este rendimiento será dependiente del caudal, como lo son el resto de curvas motrices reales de la máquina.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un análisis comparativo, en una misma red de distribución, para mostrar la importancia de considerar el rendimiento variable en función del caudal, cuando se desarrollan análisis de energía recuperable.

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología de desarrollo del análisis comparativo.

El hecho de considerar el rendimiento variable obliga a tener en cuenta que el caudal es variable en el tiempo. Por lo tanto, la altura recuperable también lo es. Considerar la variabilidad de los tres términos: caudal, altura y rendimiento ha supuesto una mejora en el desarrollo de los estudios energéticos (Pérez-Sánchez 2017) frente a los sistemas que consideran curvas de modulación medias diarias o caudales medios de operación (Samora et al. 2016), los cuales pueden ser tenidos en cuenta en el desarrollo de auditorías energéticas para obtener valores que permitan estimar la mejora de la eficiencia energética dentro del sistema de explotación (Pardo et al 2013). La metodología para llevar a cabo el análisis comparativo en este caso de estudio es presentada en la Figura 1.

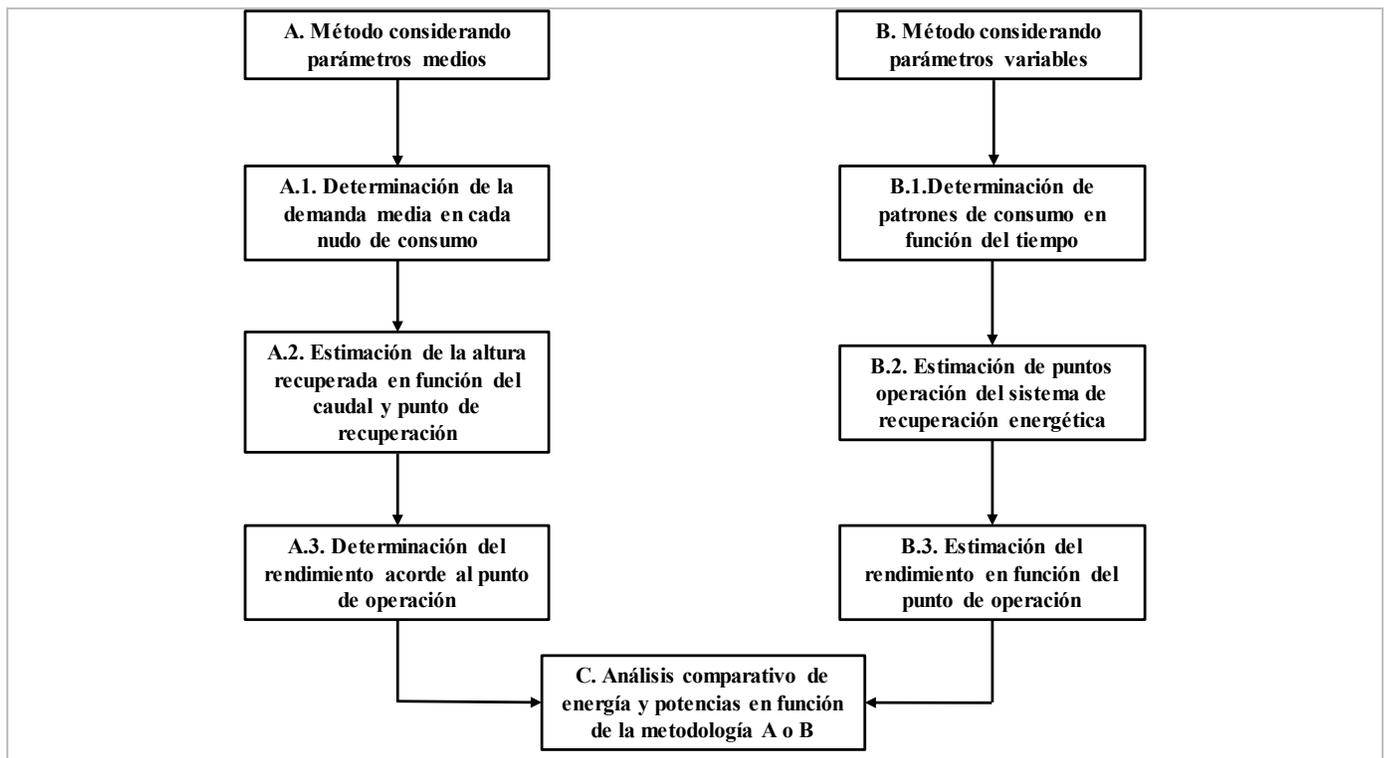


Figura 1 | Metodología propuesta para desarrollar el análisis comparativo.

- A. Método considerando parámetros medios: en este caso se determina el caudal medio anual circulante en el punto de recuperación energética considerando. Si el punto de recuperación está situado en un nudo de consumo, el caudal medio se corresponde con las necesidades de riego o de consumo (en caso de que sea un punto de abastecimiento urbano). Si es una línea, el caudal puede ser determinado como el caudal medio registrado si se dispone de elemento de medida. En el

caso de que el caudal sea estimado por algún método en concreto (e.g., Clément (Clément 1966), Patrones de consumo (Pérez-Sánchez et al. 2017b), redes neuronales (Martínez-Solano et al. 2008)), es necesario determinar el valor del caudal medio. Definido el patrón medio de consumo, la red es simulada mediante el software WaterGEMS® bajo licencia educacional (Nazari y Meisami, 2008), determinando el valor de energía recuperada atendiendo al valor de caudal y altura recuperada, considerando un valor de eficiencia medio recomendado (e.g., 0.55, valor propuesto por Castro (2006)). Cómo el punto de operación no varía, éste puede determinarse mediante una curva de bomba trabajando como turbina. Asimismo también puede conocerse a través de cualquiera de los métodos empíricos existentes que permiten determinar los valores de caudal, altura y rendimiento de la bomba operando como turbina, si son conocidos los puntos óptimos de funcionamiento cuando la máquina opera como bomba. Dentro de los métodos más usados, es el denominado Método de Sharman (Nautiyal et al. 2010). Conocidos los valores de caudal y rendimiento puede determinarse la energía recuperada por la máquina hidráulica.

- B. Método considerando parámetros variables: en este segundo caso, los parámetros de los cuales depende la recuperación energética (caudal, altura recuperada y eficiencia). El análisis de la variabilidad del rendimiento conlleva en primer lugar, la determinación de los patrones de consumo en función del tiempo (B.1.). En el caso de estudio presentado, se utiliza la metodología desarrollada por Pérez-Sánchez et al. (2016), la cual depende de los hábitos de los agricultores como puede ser necesidades de riego, tendencia al riego, máximo día entre riegos, dotación y tiempo de riego. Definidas las curvas de modulación a través de los patrones de consumo en función del tiempo, la red es simulada de nuevo con WaterGEMS®, atendiendo a curvas teóricas de *PATs*. Este proceso previo es fundamental, de manera anterior a la optimización para seleccionar los mejores emplazamientos de turbinas en una red de distribución. Una vez, determinados los caudales circulantes, para cada intervalo de tiempo, a través del balance energético propuesto por Pérez-Sánchez et al. (2016) puede establecerse los valores totales de energía teórica recuperable, energía disipada por fricción, energía necesaria para el suministro, así como la energía teóricamente no recuperable para cada instante. La discretización temporal permite determinar tanto la frecuencia relativa y acumulada de potencias generadas en cada uno de los instantes de cálculo y punto analizado. Por tanto, conocer la pareja de valores (caudal y altura recuperada) permite determinar la zona de operación de la máquina, y por tanto la selección de la misma. Una vez son conocidos (B.1. y B.2.), y la máquina es seleccionada, rendimiento puede ser determinado para cada instante, permitiendo analizar la variación del mismo, así como determinar el valor instantáneo real de rendimiento en cada caso (B.3.). La variación del rendimiento solamente puede conocerse si la curva caudal-altura recuperada (Q-H) y caudal-rendimiento (Q- η) son conocidas. Estas curvas pueden ser aportadas por el fabricante, pueden ser determinadas de forma experimentalmente en laboratorio o pueden ser estimada en función de la velocidad específica, en función del coeficiente adimensional de descarga y de altura. Estas curvas fueron revisadas y unificadas en el trabajo presentado por Pérez-Sánchez et al. (2017), vienen definidas por las expresiones (1) y (2), las cuales definen el coeficiente de descarga y coeficiente de altura, respectivamente.

$$\varphi = \frac{Q}{ND^3} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{H}{N^2 D^2} \quad (2)$$

donde Q es el caudal turbinado en m³/s, H es la altura recuperada en mca, N es la velocidad de rotación en rpm y D es el diámetro del rodete en m.

- C. Análisis comparativo de energía y potencia. Se realiza un análisis entre los valores obtenidos de energía y potencia a instalar, teniendo en cuenta si se consideran patrones medios (Apartado A) o patrones variables en el tiempo (Apartado B)

Caso de Estudio

Descripción instalación hidráulica experimental

Para analizar la metodología desarrollada se ha utilizado una red de riego a la demanda situada en Vallada (Valencia, España) (Figura 2). La red riega 290.2 ha con agua procedente de un sondeo subterráneo. El agua es almacenada en una balsa de riego de 7000 m³, con cota suficiente para garantizar un mínimo de 30 mca para cada toma.

La red de riego está formada por tuberías de fibrocemento (con diámetros comprendidos entre 300 y 500), PVC (con diámetros entre 125 y 250) y fundición (cuyo diámetro es DN150). La red cuenta con 70 hidrantes multi-toma. En el interior de cada uno de estos hidrantes existe un colector del que salen tuberías de PEAD para cada una de las tomas y están instalados los contadores que permite la lectura de los volúmenes regados en cada toma.

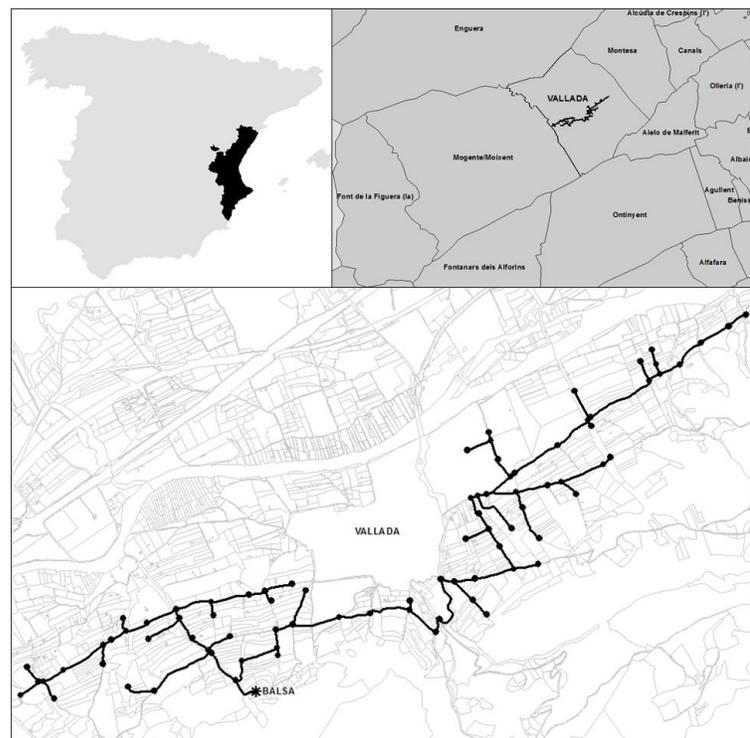


Figura 2 | Metodología propuesta para desarrollar el análisis comparativo.

El principal cultivo existente son los cítricos, existiendo una pequeña parte de olivos. El sistema de riego instalado para toda la zona es riego por goteo. En la red de riego a la demanda se han estudiado:

- a) Las lecturas de contador de cada toma desde que la red se encuentra en servicio (año 2003) hasta el año 2014, lo que ha permitido la determinación de las curvas de consumos reales anuales para cada toma, agrupándolas según tipos, acorde al cultivo y consumo registrado en cada uno de los contadores (Figura 3).

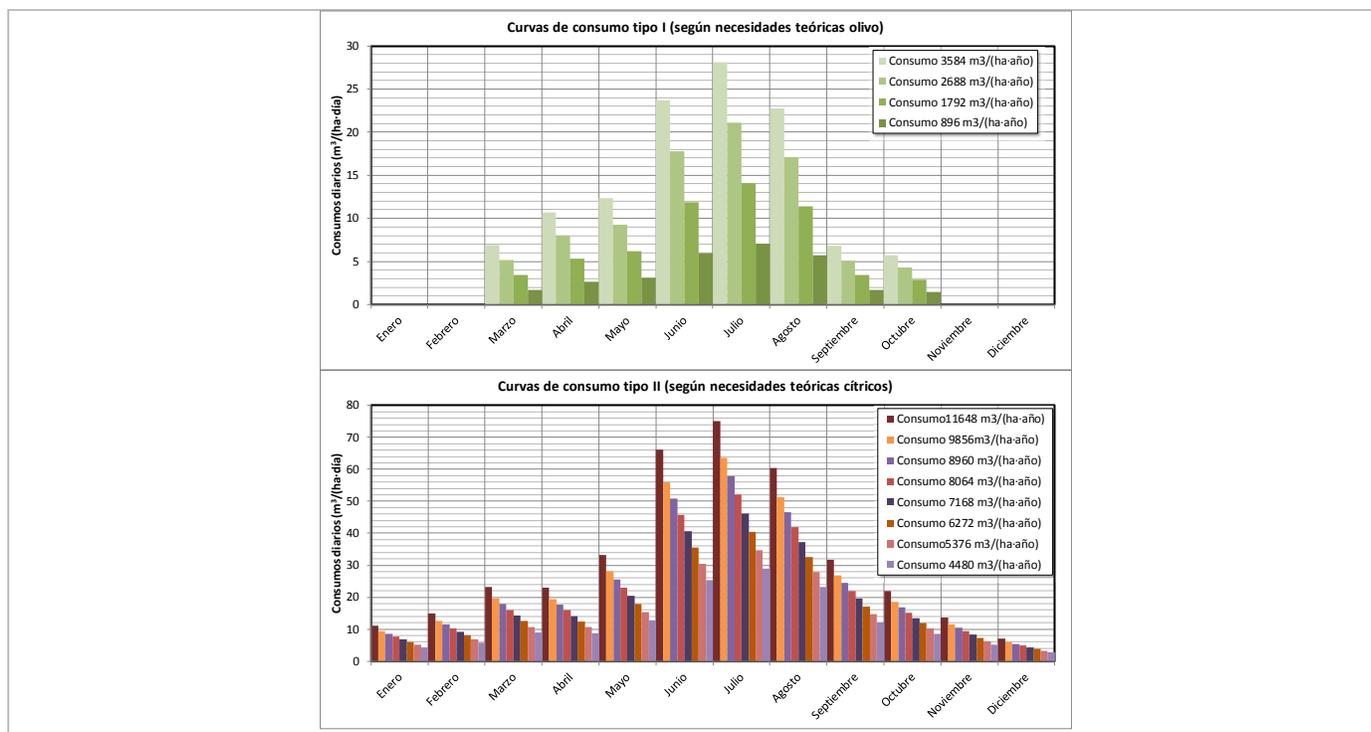


Figura 3 | Consumos utilizados para determinar los patrones de consumo a partir de la metodología propuesta por Pérez-Sánchez et al. (2016)

- b) Cálculo de los caudales de diseño (pluviosidad) para cada una de las parcelas, en función de marco de plantación y características de la instalación de riego (distancia entre portagoteros, goteros instalados.). Del estudio de cada parcela se han establecido el número de sectores de riego. Esto ha permitido asignar a cada toma una dotación de riego, en función de la instalación existente, así como de la superficie a regar en la parcela.
- c) Los hábitos de los agricultores. Estos han estimado a partir de una serie de entrevistas representativas a los usuarios y del equipo explotación, donde se han determinado la forma de manejo del riego tanto a nivel anual, mensual, semanal y diario. En base a estas entrevistas se han elaborado una serie de curvas de comportamiento, que han permitido tener en cuenta las prácticas más habituales, tal y como se adjunta en la Figura 4.

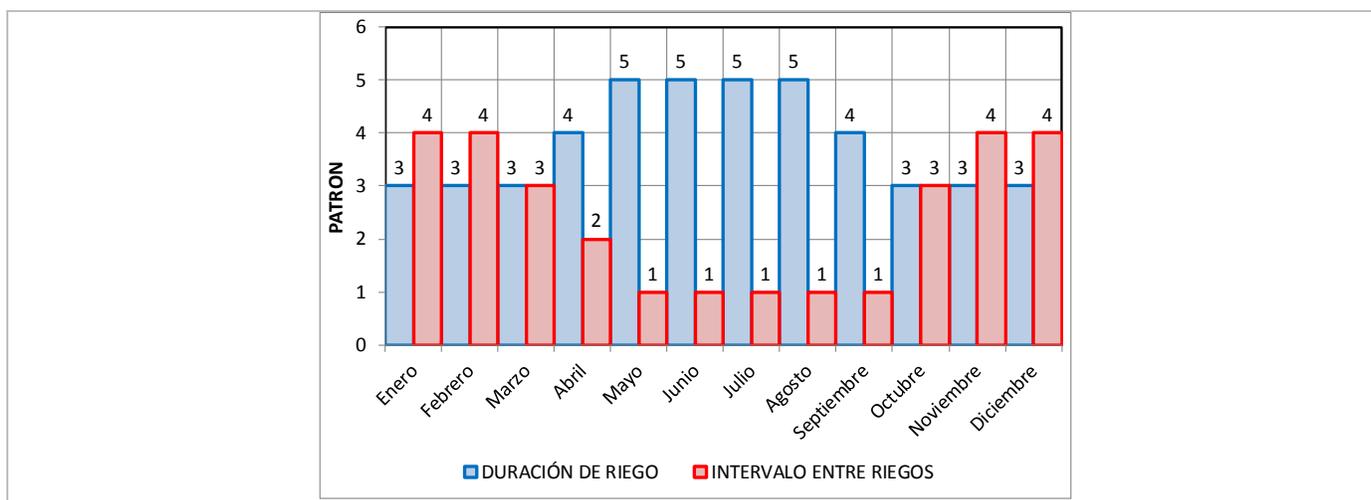


Figura 4 | Ejemplo de patrones de utilizados en la determinación de la curva de modulación. Duración del riego en horas e Intervalo entre riegos en días.

- d) Las curvas experimentales en función de la velocidad específica, coeficiente adimensional de descarga y de altura descrito en la sección anterior, las cuales vienen definidas por la expresión (3) y coeficientes de la Tabla 1, y el rendimiento viene definido por la Figura 5.

$$\psi = A\varphi^2 + B\varphi + C \tag{3}$$

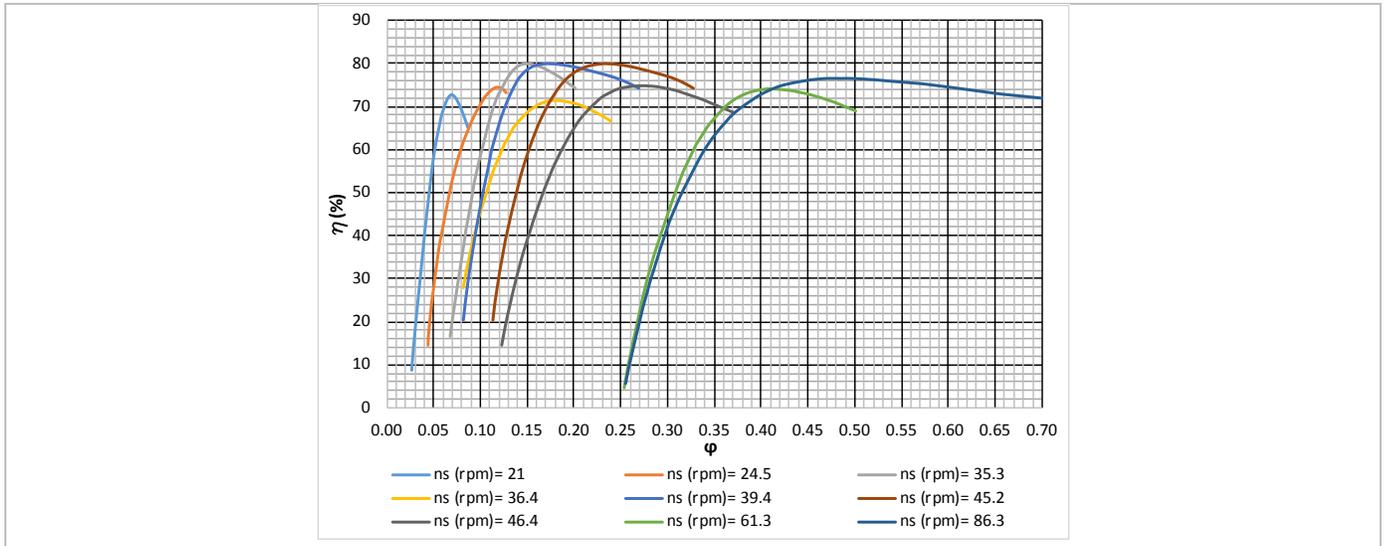


Figura 5 | Curva de rendimiento en función del coeficiente de descarga adaptada de Pérez et al. (2017)

Tabla 1 | Coeficientes A, B y C para determinar la curva Q-H en función de los coeficientes adimensionales de descarga y altura.

Ns (rpm)	Curva $\psi - \varphi$			
	A	B	C	R ²
21.0	3389.00	-273.75	10.84	0.9979
24.5	937.05	-60.258	5.94	0.9991
35.3	432.72	-51.51	5.75	0.9998
36.4	229.13	-18.744	3.75	0.9997
39.4	247.23	-38.855	4.93	0.9998
45.2	99.474	-1.82	1.11	0.9999
46.4	117.65	-21.09	4.44	0.9998
61.3	37.573	-4.80	1.42	0.9999
86.4	18.99	-0.021	0.56	0.9989

RESULTADOS

El análisis comparativo se lleva a cabo como ejemplo en una línea (línea 22, Figura 1. Izda) de la red de distribución de riego a la demanda localizada en Vallada (Valencia). Determinada la altura teórica recuperable en función del caudal circulante por la línea en cada instante y garantizando la presión mínima de servicio en la red, se selecciona una PAT (Figura 6. Izda) de la cual se conocen sus curvas teóricas de caudal-altura (Q-H) y caudal-rendimiento (Q-η).

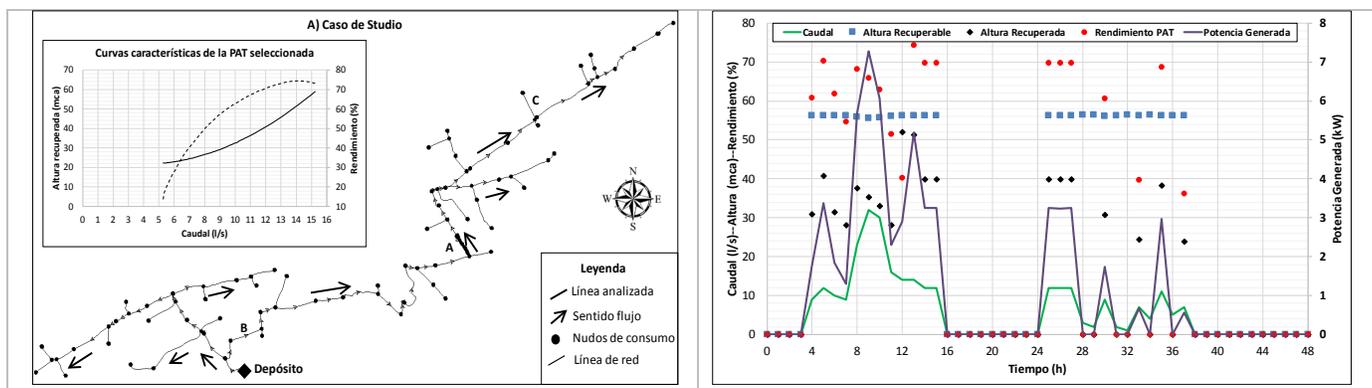


Figura 6 | Topología de la red y curva de *PAT* seleccionada (Izda). Caudal, altura recuperable, altura recuperada y rendimiento (dcha).

La metodología descrita se ha aplicado a tres casos de estudio diferentes en la red de Vallada aquí denominados (Caso 1, Línea A; Caso 2, Línea B; y Caso 3, Línea C, respectivamente, Figura 6. Izquierda), mostrando la variabilidad de valores en función del tiempo, obtenidos de energía recuperada cuando las curvas teóricas son tenidas en cuenta (Figura 6. Derecha) así como diferencia de valores globales (Figura 7). En el caso 1 (Línea A), si se considera un rendimiento medio (igual a 0.55 (Castro, 2006)) y los valores disipados (Q , H) por la válvula reductora de presión, la energía teórica recuperable es 46.06 MWh/año. Si la simulación es abordada considerando la curva característica Q - H y el rendimiento medio de la *PAT* (0.460), la energía recuperada es 12.87 MWh/año, suponiendo una reducción del 72.04% frente a la energía recuperable, los cuales están mostrados en la Figura 7. Finalmente, si la simulación es abordada considerando ambas curvas características de la máquina, la recuperación es igual a 9.81 MWh/año, reduciéndose la energía recuperada un 78.71% respecto la energía teórica recuperable y un 23.41% si es comparado con el valor obtenido con la energía recuperable considerando la curva Q - H . Este primer análisis muestra la importante repercusión que tiene considerar o no las curvas características de las máquinas cuando se desarrollan los estudios que buscan mejorar el nexo agua-energía. El valor máximo del rendimiento es 74.58% mientras que el rendimiento mínimo es del 9.86%. En el caso concreto de analizar la potencia a instalar, el valor teórico es 33.80 kW, mientras que, si se tiene en cuenta el rendimiento de la máquina variable en el tiempo, la potencia a instalar es 16.30 kW.

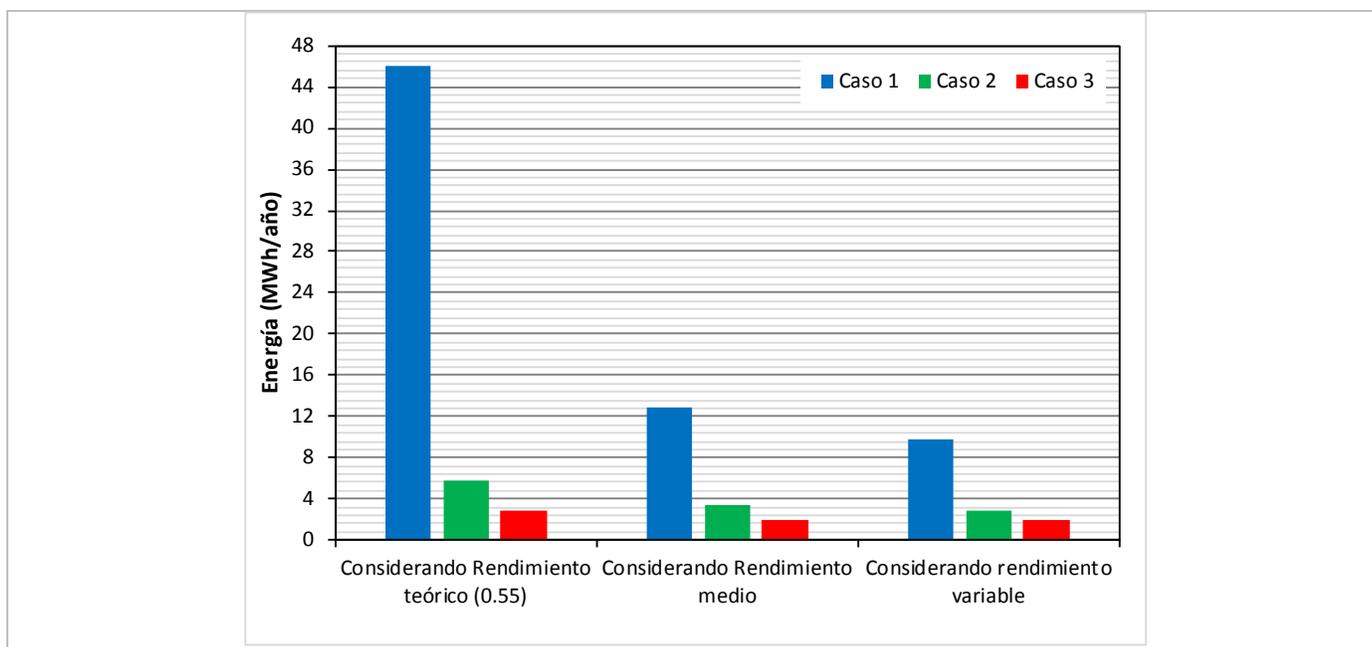


Figura 7 | Energía recuperada en función del caso de estudio e hipótesis de rendimiento.

Del mismo modo, si el análisis se realiza para el caso 2 (Línea B), la energía recuperada es 5.84 MWh/año cuando se considera un rendimiento medio de 0.55. En el caso de considerar la curva característica de la Q-H y rendimiento medio de la PAT propuesta (en este caso es igual a 0.694), siendo la energía recuperada igual a 3.35 MWh/año, siendo este valor un 57.36% del valor teórico de energía recuperada. Finalmente, si se considera el rendimiento variable en cada instante, la energía recuperada es igual 2.90 MWh/año. Este valor representa un 27.43% de la energía teórica recuperada considerando el rendimiento teórico. Si la potencia es analizada, el valor teórico de la máquina instalada es igual a 7.08 kW. Cuando el rendimiento es tenido en cuenta la potencia a instalar es 2.90 kW, un 40.96% del valor teórico. Si la variabilidad del rendimiento se tiene en cuenta, éste oscila entre un mínimo de 35.52% y un máximo de 84.90%.

El análisis de un tercer sistema de recuperación (Caso 3), situada en la línea C, muestra resultados similares. La energía teórica recuperable es igual a 2.80 MWh/año cuando un rendimiento medio teórico recomendado por la bibliografía es considerado. Si se considera el valor medio del rendimiento teniendo en cuenta la curva Q-H, el rendimiento medio es igual a 0.825, y por la tanto la energía teórica es igual a 2.02 MWh/año. Este valor de energía recuperable presenta un 72.14% del valor teórico estimado, mientras que si se tienen en cuenta la variabilidad del rendimiento, el cual oscila entre el 69.64 y el 84.90%, la energía recuperada es igual a 1.98 MWh/año, un 70.71% del valor de la energía teórica estimada. En este caso la potencia teórica a instalar sería 6.94 kW, mientras que la potencia real a instalar teniendo en cuenta los puntos de operación y rendimiento es 5.49 kW, un 79.10%. De esta manera, en el caso que nos ocupa, la consideración de valores teóricos para el rendimiento sobreestima la energía potencialmente recuperable.

CONCLUSIONES

La presente comunicación muestra la importancia de considerar la discretización temporal en los estudios energéticos cuando a partir de éstos, se pretendan llevar a cabo medidas correctoras destinadas a incrementar la sostenibilidad de un sistema hidráulico de distribución y aumentar la eficiencia energética del mismo. Apoyada en la metodología propuesta por Pérez-Sánchez et al. (2016), el presente trabajo desarrolla un análisis comparativo considerando un valor de rendimiento teórico, rendimiento medio y rendimiento variable en función del punto de operación con apoyo del software WaterGEMS®. El rendimiento medio y variable en función del punto de operación ha sido determinado mediante el uso de curvas experimentales basadas en los coeficientes de descarga y altura para PATs, las cuales han sido presentadas en la presente comunicación.

Para avalar la aplicabilidad de la presente metodología para hacer una cuantificación meticulosa de la energía potencialmente recuperable se ha implementado la misma en una red real. El análisis de los tres casos en la red de Vallada (Valencia) ha puesto de manifiesto la diferencia de valores de energía recuperada que existe de considerar o no el rendimiento variable con reducciones de energía recuperada de hasta el 78.41%, cuando se considera el rendimiento variable. Estas variaciones presentan importantes repercusiones en los análisis de energéticos y de viabilidad económica de implantación de los mismos, al dar valores sobreestimados cuando no se considera el rendimiento variable con el caudal. Ello demuestra la de la implementación de las curvas Q-H y Q- η a lo largo del tiempo por parte de los gestores de sistemas de distribución en los modelos de desarrollados para su explotación.

REFERENCIAS

- Cabrera, E., Pardo, M.; Cobacho, R., Cabrera Jr., E., 2010. *Energy audit of water networks*. Journal Water Resource Planning and Management. 136, 669–677. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Del Giudice, G., Ramos, H.M. 2014. Energy Recovery in Water Systems by PATs: A Comparisons among the Different Installation Schemes. *Procedia Engineering* 70: 275–84.
- Castro, A., 2006. Minicentrales Hidroeléctricas. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía., Madrid.

- Clément R, 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche* 5: 553-575.
- Martínez-Solano J, Iglesias-Rey PL, Pérez-García R, López-Jiménez PA. 2008. Hydraulic analysis of peak demand in looped water distribution networks. *Journal Water Resources Plan Managment* 134: 504-510.
- Nautiyal H, Varun & Kumar A. 2010. Reverse running pumps analytical, experimental and computational study: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7):2059–2067.
- Nazari, A., Meisami, H. 2008. Instructing WaterGEMS Software Usage. Tehran.
- Ortiz Flórez, R. & Abella Jiménez, J., 2008. Máquinas Hidráulicas Reversibles Aplicadas a Micro Centrales Hidroeléctricas. *IEEE Latin America Transaction*, 6(2):170–175.
- Pardo, M.A., Manzano, J., Cabrera, E., García-Serra, J., 2013. Energy audit of irrigation networks. *Biosystems Engineering*. 115: 89–101.
- Pérez-Sánchez, M., 2017. Methodology for energy efficiency analysis in pressurized irrigation networks. Practical application. Universitat Politècnica de València.
- Pérez-Sánchez M, Sánchez-Romero F, Ramos H, López-Jiménez P. Modeling Irrigation Networks for the Quantification of Potential Energy Recovering: A Case Study. *Water*. 2016;8(6):1-26. doi:10.3390/w8060234.
- Pérez-Sánchez M, Sánchez-Romero F, Ramos H, López-Jiménez P. Calibrating a flow model in an irrigation network: Case study in Alicante, Spain. *Spanish Journal Agricultural Research*. 2017;15(1): e1202. doi: 10.5424/sjar/2017151-10144.
- Ramos, H., Borga. A. 1999. Pumps as Turbines: An Unconventional Solution to Energy Production. *Urban Water* 1(3): 261–63.
- Samora, I., Franca, M., Schleiss, A., Ramos, H., 2016. Simulated Annealing in Optimization of Energy Production in a Water Supply Network. *Water Resources Management* 30, 1533–1547. doi:10.1007/s11269-016-1238-5
- Sitzenfrei, R, von Leon, J. 2014. Long-Time Simulation of Water Distribution Systems for the Design of Small Hydropower Systems. *Renewable Energy* 72: 182–87.