

# Evaluación de la instalación de microturbinas en redes hidráulicas a presión

Rodríguez-Pérez, A.M.<sup>a1</sup>, Pulido-Calvo, I.<sup>a2</sup>, Pereira-Villaseñor, M.<sup>b1</sup> y Domínguez-Castro, L.<sup>b2</sup>

<sup>a</sup>Área de Mecánica de Fluidos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Campus La Rábida, Universidad de Huelva, 21819 Palos de la Frontera (Huelva). E-mail: <sup>a1</sup>angel31r.b@gmail.com, <sup>a2</sup>ipulido@dcac.uhu.es.

<sup>b</sup>Giahsa, Ctra. A-492 km 4, Aljaraque (Huelva). E-mail: <sup>b1</sup>mpereira@giahsa.com, <sup>b2</sup>ldcastro@giahsa.com

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

## RESUMEN

En este trabajo se plantea el análisis y valoración del uso de microturbinas para aprovechar la energía hidráulica disipada en sistemas de distribución de agua a presión. Se están estudiando los puntos idóneos de instalación en redes hidráulicas a presión gestionados por Giahsa, empresa pública de gestión de la Mancomunidad de Servicios de la Provincia de Huelva (MAS). En una primera fase, se está evaluando el sistema de distribución situado entre la balsa del Cabezo del Pasto en la comarca del Andévalo (Huelva) y la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) en el término municipal de Puebla de Guzmán (Huelva). Los resultados muestran que con la instalación de una turbina de acción tipo Pelton con dos inyectores se puede aprovechar una energía anual de aproximadamente 537 MWh.

## INTRODUCCIÓN

La alternativa de generar electricidad a partir de la energía hidráulica en exceso y no utilizada en sistemas de distribución de agua a presión puede ser una actuación acorde con las políticas de eficiencia y ahorro energético prioritarias en la gestión de este tipo de instalaciones debido a los constantes incrementos en los costes de producción de la partida correspondiente al consumo de energía eléctrica. Asimismo, la Estrategia Europa 2020 apuesta por un crecimiento sostenible definido como la promoción de una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, que sea más verde y competitiva (Comisión Europea, 2011).

En la literatura especializada se pueden encontrar algunos ejemplos recientes de evaluación de la instalación de microturbinas colocadas en puntos seleccionados de redes hidráulicas urbanas (Sunderland et al. 2013; Kim et al. 2015; Samora et al. 2016a).

En este trabajo, el sistema de distribución de agua en estudio parte del embalse del Andévalo (Huelva) donde se encuentra una estación de bombeo que impulsa el agua hasta la balsa del Cabezo del Pasto (Huelva) (cota de 236,4 m). Desde esta balsa el agua se distribuye por gravedad hasta la ETAP de Puebla de Guzmán (cota de 186,4 m), donde a la entrada se encuentra una válvula reguladora eléctrica DN300 multichorro (Multinar) que se encarga de regular el caudal y la presión de entrada a la estación de tratamiento. El caudal medio de entrada es de 120 l/s.

Se plantean dos alternativas para la colocación de la microturbina (Samora et al. 2016b). La primera sería colocarla antes de que el agua llegue a la válvula reguladora, con esto se consigue aprovechar el exceso de caudal y presión que lleva la tubería. A 1692 m de la salida de la balsa hay un punto óptimo a cota 157,3 m para colocar dicha microturbina, lo que implica un desnivel de 89,1 m. También hay que tener en cuenta que la distancia desde la balsa a la ETAP es de 5600 m y si se colocara, por ejemplo, en la entrada de la ETAP las pérdidas de carga de la tubería serían muy altas.

La segunda alternativa sería la colocación de la microturbina en paralelo (instalación en by-pass) a la válvula reductora, de esta manera, a través de una válvula motorizada se realizaría el control de la instalación (Corcoran et al. 2014; McNabola et

al. 2015), haciendo que pase más o menos caudal por la turbina. En el caso en estudio, esta segunda alternativa no parece la más idónea debido a que supondría un mayor coste de la instalación y una menor rentabilidad al tener que colocar la microturbina más cerca de la ETAP, lo que supone un menor desnivel y mayores pérdidas de carga en la tubería.

Otro aspecto a tener en cuenta es el número de microturbinas a colocar. Samora et al. (2016c) plantean la instalación de cuatro microturbinas en paralelo este tipo de instalación consiste en activar las turbinas dependiendo de la demanda que tengamos.

Por tanto, el objetivo global de este estudio es evaluar la posibilidad de generar energía a partir de una fuente renovable, la energía hidráulica que se está disipando en la válvula reguladora en la entrada de la ETAP Puebla de Guzmán (Huelva). Se analiza el tipo de microturbina a instalar y la energía media anual aprovechable.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Área de estudio

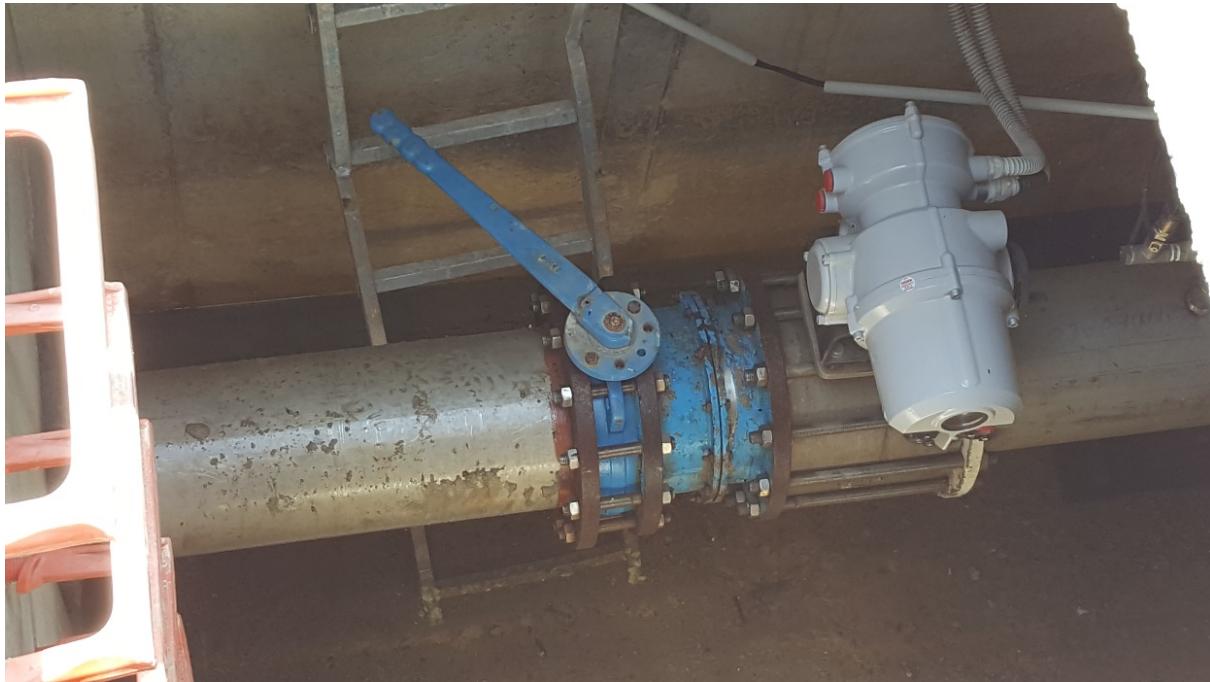
En la figura 1 se muestra el trazado de la tubería (fundición dúctil, diámetro 500 mm) desde la balsa Cabezo del Pasto hasta la ETAP situada en la Puebla de Guzmán (Huelva). Entre la balsa y la localidad de Herrerías se estudia colocar una microturbina a 1692 m de distancia de la salida del agua de la balsa. La balsa se encuentra a 236,40 m de altitud sobre el nivel del mar mientras que el punto donde se va a estudiar colocar la microturbina se encuentra a 157,27 m de altitud lo que supone un desnivel de 79,13 m. Se ha elegido este punto de la instalación debido a que la altitud a la que se encuentra es prácticamente la menor de todo el trayecto entre la balsa y la ETAP. Hay que tener en cuenta la energía necesaria con la que el agua debe salir de la microturbina para que llegue a la ETAP. Si es necesario se debería colocar en una cota algo superior a la seleccionada.

En todo el trazado solo se encuentra una cota menor a la indicada anteriormente que es a una distancia de 1997 metros de la balsa y a una altitud de 156,58 m. Este punto de la instalación ha sido descartado debido a que la diferencia de altitud es de 0,69 m con respecto al punto elegido y esta pequeña diferencia de altitud no compensa con las pérdidas de carga que tiene la tubería en esos 305 m que tiene que recorrer de más el agua hasta llegar a la microturbina.



Figura 1 | Trazado de la instalación y punto seleccionado para la colocación de la microturbina

La instalación actual cuenta con una válvula reguladora eléctrica DN300 multichorro (Multinar) justo en la entrada de la ETAP (Figura 2). Esta válvula se encarga de reducir el caudal que llega a la misma pasando de ser de 220 l/s cuando se encuentra la válvula totalmente abierta a 120 l/s que es el caudal que normalmente se utiliza en la instalación. En este proceso la válvula no solo reduce el caudal sino que también reduce la energía que trae el agua en exceso, este exceso es el que se pretende utilizar. Al colocar la microturbina el agua llegaría con una menor energía a la válvula reguladora lo cual no sería un problema ya que llega con exceso de la misma.



**Figura 2** | Válvula reguladora eléctrica DN300 multichorro (Multinar) que controla el caudal de entrada a la ETAP de Puebla de Guzmán (Huelva)

La balsa Cabeza del Pasto tiene una capacidad de 140.000 m<sup>3</sup> de agua y actúa como depósito de almacenamiento y suministro para la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) de Puebla de Guzmán (Figura 3). Esta balsa tiene muy pocos años desde su construcción, en el año 2013 y se construyó en el punto más alto posible, para que por gravedad llegara el agua hasta la ETAP sin necesidad de la utilización de bombas adicionales.



**Figura 3** | Balsa Cabezo del Pasto que distribuye el agua a la ETAP de Puebla de Guzmán (Huelva)

Esta balsa es alimentada por 4 grupos de bombeo que toman el agua del embalse del Andévalo (Huelva). La capacidad individual de cada bomba es de 470 l/s con una altura de energía suministrada de 53 m (Figura 4). El esquema de operación de esta estación de bombeo es dependiente del volumen de agua de la balsa Cabezo del Pasto. Cuando el nivel de la balsa llega a unos valores mínimos indicados se ponen en funcionamiento la estación de bombeo hasta llegar a la capacidad máxima de la balsa.

El Embalse del Andévalo que tiene una capacidad de 600 hm<sup>3</sup> y con posibilidad de ser recrecido hasta los 1025 hm<sup>3</sup>, esto supone que es el embalse con mayor capacidad de toda la provincia de Huelva. Este embalse fue construido en 2003 e inaugurado en 2004. Este embalse fue construido debido a la gran necesidad que había del mismo para la distribución de agua potable en toda la comarca del Andévalo.



**Figura 4** | Estación de bombeo que toma el agua del Embalse del Andévalo (Huelva)

## Alternativas de instalación y selección de la microturbina

A la hora de calcular nuestra instalación debemos seguir varios pasos. En primer lugar, se debe plantear dónde y cómo se va a instalar la microturbina, es decir, en qué punto de la tubería en estudio y en serie o en paralelo al trazado de la tubería en estudio.

Para la localización óptima de la microturbina se tienen en cuenta tres factores: (a) la altitud que debe ser lo más baja posible para que la potencia con la que llegue el agua debido a la gravedad sea mayor; (b) la distancia a la que se encuentra dicho punto elegido de la balsa de salida ya que mientras más alejado se encuentre habrá una mayor pérdida de carga debido al rozamiento con la tubería; y (c) la energía del agua a la salida de la microturbina sea la mínima necesaria para que llegue a la ETAP.

Una vez elegida la localización de la instalación se debe proceder al cálculo de la velocidad con la que el fluido agua llegaría a la microturbina así como la energía que llega a la misma. Para el cálculo de las pérdidas de energía por rozamiento se utilizan las ecuaciones de Darcy - Weisbach y White- Colebrook. Sabiendo el caudal, potencia y velocidad con la que le llega el agua a la microturbina se procede a la elección de la misma: tipo de turbina (Pelton, Francis...), numero de inyectores de la turbina (un inyector o varios inyectores) y el número de pares de polos del generador asincrónico (dos pares, tres pares, cuatro pares,...). Una vez se tengan estos datos ya se puede obtener la energía en MWh que sería capaz de suministrar la microturbina al año.

Una vez obtenido lo que genera al año, dependiendo la energía que aun llega en exceso a la válvula se comprueba si hay necesidad de colocar una segunda microturbina y se colocaría en serie o en paralelo.

La segunda alternativa de instalación, como ya se ha comentado anteriormente, sería colocar la microturbina en paralelo a la válvula reguladora. Es sólo tiene sentido si se coloca relativamente cerca de donde se encuentra la válvula ya que si, por ejemplo, se colocara en el punto de localización óptimo de la alternativa anterior se necesitan 4000 m de tubería y esto encarecería mucho la instalación. El problema que se presenta al instalarla cerca de la válvula reguladora es que la cota a la que se encuentra la ETAP es mucho más alta y, por lo tanto, se pierde energía a la entrada de la microturbina. También ocurre otro inconveniente, al encontrarse este punto más lejos de la Balsa Cabezo del Pasto, que es de donde proviene el agua, tiene que pasar por más metros de tubería y esto conlleva a una mayor pérdida de carga. Estos dos inconvenientes hacen que esta alternativa se halla descartado y solo se estudie la primera alternativa propuesta.

## RESULTADOS

Primero se calcula la velocidad U a la que llega en agua a la microturbina, considerando un caudal Q de 0,202 m<sup>3</sup>/s y un diámetro D de la tubería de 500 mm:

$$Q = U \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow U = 1,12 \text{ m/s} \quad (1)$$

Para calcular el factor de fricción f de la tubería de descarga hay que aplicar la ecuación de White- Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{K/D}{3,7} + \frac{2,51}{R \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

siendo K la aspereza absoluta de la tubería de fundición dúctil (K= 0,05; León-Martín et al. 2011) y R el número de Reynolds.

Despejando los datos que tenemos en la ecuación obtenemos:

$$f = 0,101 \text{ (factor de fricción)}$$

La balsa se encuentra a 236,4 metros de altitud, mientras que a la altitud que queremos colocar la microturbina es de 157,27 metros.

$$\Delta H = 236,40 - 157,27 = 79,13 \text{ metros} \quad (3)$$

Ahora vamos a calcular las pérdidas que tiene la tubería en el tramo entre la balsa y donde vamos a colocar la microturbina.

Darcy - Weisbach

$$h_{f,Tub} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{U^2}{2g} = 21,85 \text{ metros} \quad (4)$$

Sustituyendo los valores que ya se tienen en esta fórmula hemos obtenido 21,85 metros que son las perdidas que se tienen en el tramos de tubería desde la balsa a donde queremos colocar la microturbina.

$$H_n = 79,13 - 21,85 = 57,28 \text{ metros} \quad (5)$$

Este dato que obtenemos es los metros reales que le llegarán a la microturbina después de quitar las perdidas. A continuación, se calcula la potencia que generaría la microturbina:

$$P = \gamma \cdot \eta \cdot Q \cdot H_n = 105,07 \text{ kW} = 143 \text{ CV} \quad (6)$$

$\eta$  = rendimiento de la microturbina en este caso va a ser 0.85.

$\gamma$  = Densidad del agua x gravedad =  $1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 9810 \text{ N/m}^3$

La microturbina estaría en funcionamiento 14 horas de media al día durante todo el año por lo tanto la energía total al año que daría sería:

$$\text{Energía} = \text{horas anuales} \times P = 536,908 \text{ MWh anuales} \quad (7)$$

$$\text{Horas anuales} = 14 \text{ horas} \times 365 \text{ días} = 14365 \text{ horas}$$

$$Ns = n \cdot Pu^{1/2} \cdot Hn^{-5/4} \quad (8)$$

$Ns$  = Velocidad específica

Para las turbinas Pelton el valor  $Ns$  con un inyector es (5 – 30) y si son varios inyectores (30 – 60).

$n$  = velocidad de giro del rodete (rpm)

$Pu$  = Potencia útil (CV)

$Hn$  = Altura neta (m)

En nuestro caso vamos a poner  $Ns = 50$  debido a que queremos colocar dos inyectores.

$$n = \frac{Ns}{Pu^{1/2} \cdot Hn^{-5/4}} = 658,88 \text{ rpm}$$

Se utiliza un generador asincrónico de 4 pares de polos, para los que la velocidad de sincronismo es de 750 rpm:

$$Ns = 60 \cdot \frac{f}{p} \Rightarrow 60 \cdot \frac{50}{4} = 750 \text{ rpm} \quad (9)$$

Y despejando la ecuación anterior con la nueva  $n$  se resuelve como:

$$n = 750 \text{ rpm}$$

$$Ns = n \cdot Pu^{1/2} \cdot Hn^{-5/4} = 750 \cdot 143^{1/2} \cdot 57,28^{-5/4} = 57 \quad (10)$$

$Ns = 57$  (Como podemos ver  $Ns$  está entre (30-60) por lo tanto es válido).

Según los resultados obtenidos la microturbina idónea para implantar sería la siguiente:

- Turbina de acción tipo Pelton con 2 inyectores
- Salto bruto ( $H_b$ ) = 79,13 m
- Salto neto ( $H_n$ ): 57,28 m
- Caudal ( $Q$ ): 0,220  $\text{m}^3/\text{s}$
- Velocidad específica de la turbina ( $Ns$ ): 57
- Potencia: 105,07 kW = 143 CV
- Horas estimadas de funcionamiento: 14 horas diarias, 5110 horas al año
- Energía:  $105,07 \text{ kW} \times 5110 \text{ h} = 536,908 \text{ MWh anuales}$
- Generador Asíncrono de 4 Pares de polos a 750 rpm

## DISCUSIÓN

En este trabajo se analiza la viabilidad de la implantación de una microturbina en una red forzada de suministro de agua. Los resultados muestran que la cantidad de energía que se puede aprovechar no es nada despreciable. La microturbina que se ha seleccionado es tipo Pelton debido a que es la que tiene una mayor eficiencia para esta cantidad de agua.

Uno de los elementos más importantes del estudio es el lugar en el que se iba a colocar la microturbina y cuál de las dos alternativas que se propusieron inicialmente se iba a utilizar. En un inicio la microturbina se pretendía colocar justo antes de la válvula reguladora que se encuentra en la entrada del agua en la ETAP. Si se colocaba en esta ubicación se podía colocar en serie o en paralelo a la válvula reguladora.

La segunda alternativa sería la colocación de la microturbina en paralelo (instalación en by-pass) a la válvula reductora, de esta manera, a través de una válvula motorizada se realizaría el control de la instalación, haciendo que pase más o menos caudal por la microturbina (Figura 5). El problema que encontramos es que esta ubicación para la microturbina es inviable por dos motivos:

En primer lugar la altitud a la que se encuentra la ETAP es superior a varios puntos de la instalación en el trayecto entre la balsa y la ETAP. Esto hace que existan esos otros puntos, en los cuales se conseguiría una solución más óptima. Tenemos que tener en cuenta que la diferencia de altitud es muy importante debido a que el agua cae por gravedad desde la balsa hasta la turbina.

En segundo lugar la longitud de la tubería es muy grande por lo que provoca unas grandes pérdidas de carga en el trayecto balsa-ETAP.

Por estos dos motivos el punto más viable será aquel que sin estar a mucha distancia de la balsa tenga la cota más baja, teniendo en cuenta que la energía del agua a la salida de la microturbina debe ser la mínima necesaria para que llegue a la ETAP.

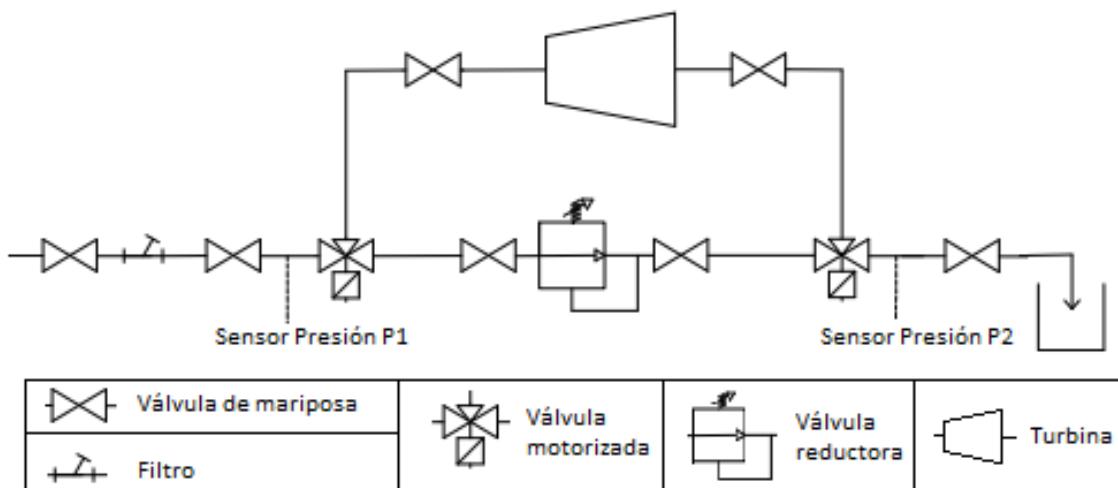


Figura 5 | Esquema de instalación en by-pass de una microturbina

Al descartar la ubicación a la entrada de la ETAP no es posible la selección de la segunda alternativa debido a que si se coloca la microturbina en el punto más óptimo de la instalación se encontraría muy alejado de la ETAP, es decir, de la válvula reguladora, por lo que se necesitaría la colocación de una tubería de muchos metros de largo y esto encarecería mucho el proyecto. Por lo tanto por motivos de rentabilidad alternativa que hemos utilizado es la primera en la cual se coloca la microturbina en serie a la válvula reguladora.

Finalmente el punto que se ha elegido para la colocación de la microturbina no es el que tiene la cota más baja pero a la hora de añadirle las pérdidas de carga de la tubería lo convierten en el más óptimo. Después de hacer todos los cálculos pertinentes para su colocación se ha elegido una microturbina Pelton con dos inyectores y un generador asincrónico de cuatro polos que funciona a 750 rpm. En este caso también se estuvo estudiando la colocación de un microturbina Francis, lo que ocurre es que debido al caudal y la velocidad con la que llega el agua a la misma no la convierten en la mejor alternativa.

Los resultados obtenidos con respecto a la energía que generaría la microturbina anualmente son bastantes buenos, tenemos que tener en cuenta que durante todo el cálculo de la instalación hemos utilizado los datos más desfavorables posibles para que cuando se ponga en marcha la instalación se genere esta energía anual como mínimo.

---

## CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la eficacia que puede llegar a tener la colocación de una microturbina en redes hidráulicas a presión y cómo se puede generar energía con una fuente renovable. Este tipo de instalaciones se están evaluando con gran interés en los últimos años ya que puede ser una alternativa idónea para una gestión eficiente en muchos sistemas urbanos de distribución de agua.

En el caso en estudio, la mejor alternativa ha sido la colocación de la microturbina en serie con la válvula reguladora, debido en gran medida a la gran distancia que hay entre la balsa y la ETAP que es donde se encuentra dicha válvula y hace inviable su colocación en paralelo. Se han conseguido unos resultados bastante interesantes gracias al gran caudal del que se dispone y de la gran diferencia de cotas que tenemos entre la balsa, que es de donde sale el agua, y el punto donde se va a colocar la microturbina.

---

## AGRADECIMIENTOS

A la empresa Giahsa, empresa pública de gestión de la Mancomunidad de Servicios de la Provincia de Huelva (MAS), por facilitar todos los datos necesarios de sus instalaciones.

---

## REFERENCIAS

Comisión Europea. 2011. *Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020*. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, el Consejo, el Comité Económico y Social europeo y el Comité de las Regiones, Bruselas (Bélgica).

Corcoran, L., McNabola, A., Coughlan, P. 2015. Optimization of water distribution networks for combined hydropower energy recovery and leakage reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(2), 1–8.

Kim, I., James, J.A., Crittenden, J. 2015. The Energy-Efficient, Economical, and Environmental Impacts of microturbines on Residential Customers. *2015 Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference (Greentech), IEEE Green Technologies Conference*, 139-146, New Orleans, LA, USA.

McNabola, A., Coughlan, P., Corcoran, L., Power, C., Williams, A. P., Harris, I., Gallagher, J., Styles, D. 2014. Energy recovery in the water industry using microhydropower: an opportunity to improve sustainability. *Water Policy* 16, 168–183.

León-Martín, I., Balairón-Pérez, L., Andrés-Martín, F.R., Berga-Cano, M.I. 2011. Estudio de la rugosidad real de conducciones en servicio para el transporte de agua. *II Jornadas de Ingeniería del Agua*, Barcelona.

Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J., Ramos, H.M. 2016a. Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: The case study of the city of Fribourg. *Water* 8, 344-356.

Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J., Ramos, H.M. 2016b. *Feasibility assessment of micro-hydropower for energy recovery in the water supply network of the city of Fribourg*. Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change, Erpicum et al. (Eds.), Taylor&Francis Group, Londres, 961-965.

Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J., Ramos, H.M. 2016c. Opportunity and economic feasibility of inline microhydropower units in water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142- 153.

Sunderlan, K.M., Mills, G., Conlon, M.F. 2013. Estimating the wind resource in an urban area: A case study of micro-wind generation potential in Dublin, Ireland. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118, 44-53.