



REDAWN

**Reducing
Energy**

**Dependency in
Atlantic Area**

Water

Networks

Orientación de diseño
sobre microhidráulica



REDAWN

**Reducing
Energy**

**Dependency in
Atlantic Area**

Water

Networks

**Orientación de diseño
sobre microhidráulica**

REDAWN
Reducing Energy Dependency
in Atlantic Area Water Networks



Interreg
Atlantic Area
European Regional Development Fund



EUROPEAN UNION



Redawn collaborators



ISBN: 978-88-9784-0718

Copyright 2021 ©



Ateneapoli srl

via Pietro Colletta, 12 (80139) Napoli - Italia

www.ateneapoli.it

BOOKSTORE

www.ateneapoli.it/libri

Sommario

1. Resumen ejecutivo	9
2. Introducción	11
3. Potencial de MHP en redes de la AA	15
4. Uso de la energía	18
Producción de Energía con conexión a red.....	18
Producción de Energía para autoconsumo.....	19
Producción de Energía para monitorización y control de WDN.....	20
Suministro de Energía a un sector de la red.....	20
Suministro de Energía a la red de aguas residuales.....	21
Recuperación de Energía en la cadena de suministro de agua.....	21
5. Tipos de dispositivos de producción de energía	22
Turbinas tradicionales.....	22
DPEs de baja potencia/alta producción.....	23
DPEs de baja potencia/baja producción.....	30
Turbocompresores.....	32
6. Datos de la red de distribución	35
7. Principios del diseño de una planta micro hidráulica (MHP) ...	43
Selección de la PAT en una instalación convencional.....	43
Instalación no convencional.....	44
Esquema de la instalación MHP y alojamiento de los equipos.....	49
Estrategia para la localización de la instalación MHP.....	51
8. Beneficios ambientales	55
9. Conclusiones	61
10. References	62
Lista de abreviaturas	68

1. Resumen ejecutivo

Este manual está dirigido a gestores de agua y energía, responsables políticos y técnicos que trabajan en el transporte y distribución de agua de diferentes sectores, como el agua potable, el riego y la industria. Las directrices básicas para la instalación de plantas Micro Hidroeléctricas (MHP) en las redes de distribución de agua (RDA) en la Zona Atlántica (AA) de Europa están definidas, siendo una estrategia excepcional para reducir la dependencia energética en las RDA de AA. Como punto de partida se examinan las oportunidades y las nuevas tecnologías para recuperar la energía potencial disponible en las RDA ejecutadas (como las utilizadas para el abastecimiento urbano, el riego, las aguas residuales y las operaciones en industria de procesos). A continuación, se examinan todos los aspectos del diseño de MHP, incluyendo la mejor ubicación de la planta en la red, la mejor configuración de la planta para un sitio determinado, el posible uso de la energía en dicha ubicación, los datos históricos que son necesarios para el diseño, el mejor dispositivo de producción de energía (DPE) posible para el sitio en cuestión, el control del DPE y el diseño de tuberías auxiliares. Todos estos puntos son cruciales para maximizar la explotación del exceso de presión, que de otra forma sería desaprovechado, y que se convertirá parcial o totalmente en energía eléctrica, utilizando la mejor tecnología disponible. Por lo general, es necesaria una conversión o aprovechamiento parcial de energía cuando se requiere una pequeña cantidad de energía en el lugar, como en el caso de una estación de monitorización y control de una red de distribución de agua. Por el contrario, una recuperación total de energía es adecuada cuando la planta MHP está conectada a la red eléctrica. En este caso, la planta MHP reemplazará una válvula reductora de presión, optimizando la presión aguas abajo de la red, sin afectar al funcionamiento normal de la red. Una PAT (Bomba como Turbina, por sus siglas en inglés Pump as Turbine) se considera generalmente la mejor tec-

Resumen ejecutivo

nología disponible para este último tipo de aplicación: el proyecto REDAWN demostró el gran potencial de la tecnología PAT para fomentar la eficiencia energética en la AA. Se concluyó que la viabilidad económica de la planta estaba estrictamente relacionada con un diseño óptimo de la instalación MHP, que además persigue un ahorro de la máxima cantidad de recursos naturales posible – especialmente en términos de agua - como consecuencia de la reducción de fugas debido a la reducción de la presión – y a la mayor cantidad de energía producida.

2. Introducción

En las redes de distribución de agua, el uso de válvulas tanto manuales como automáticas está muy extendido, con la finalidad de reducir el exceso de presión en una parte de la red. Pero ¿por qué la altura de presión no es uniforme en la red? Es necesario dar respuesta a esta pregunta. Una segunda pregunta está relacionada con el uso de válvulas reductoras de presión (PRV). ¿Por qué se debe contener los excesos de presión?

Si consideramos el croquis simplificado de una pequeña parte de una red en la Figura 1, observaremos que la variabilidad de altura de presión está determinada por dos factores. En primer lugar, la elevación o cota del suelo y la altura del edificio es muy variable y la altura de presión requerida por los usuarios finales reflejan esta variabilidad. En segundo lugar, la línea de energía disminuye con la distancia de la fuente de agua como efecto de las pérdidas de carga, resultando en una reducción de la altura de presión en la periferia de la red. Por tanto, la variabilidad de la altura de presión en las redes puede considerarse como una situación común, tanto en para las redes de abastecimiento como de riego.

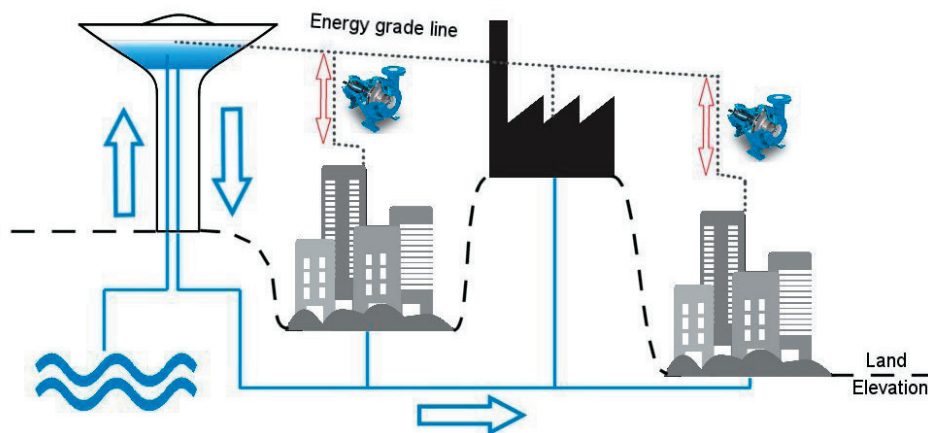


Figura 1. Ubicaciones típicas de la red de agua para la recuperación de energía con MHP

Una presión mayor que el valor mínimo requerido por los usuarios finales se considera una condición desfavorable. La reducción de las fugas durante el transporte y distribución de agua es un verdadero desafío para los servicios públicos de agua. Las estadísticas en Europa, referidas a los años 2012-2015, muestran que la cantidad o volumen de fugas es muy variable de un país a otro, con un valor medio del 23% (Figura 2). Para los países dentro del programa Interreg, las pérdidas de agua oscilan aproximadamente entre el 20% y el 30%. En lugar de un reemplazo general de las tuberías más antiguas, generalmente se aceptan dos estrategias para reducir las fugas: la sectorización de redes con sistemas de monitorización y control (District Management Areas o DMAs), con el fin de equilibrar las presiones y hacer un equilibrio o balance más preciso del recurso, y la estrategia de reducción de la presión, donde las presiones en la red se reducen para minimizar el volumen de fugas de agua. En ambas estrategias, las válvulas manuales, motorizadas o neumáticas se encuentran en puntos seleccionados de la red para reducir la presión.

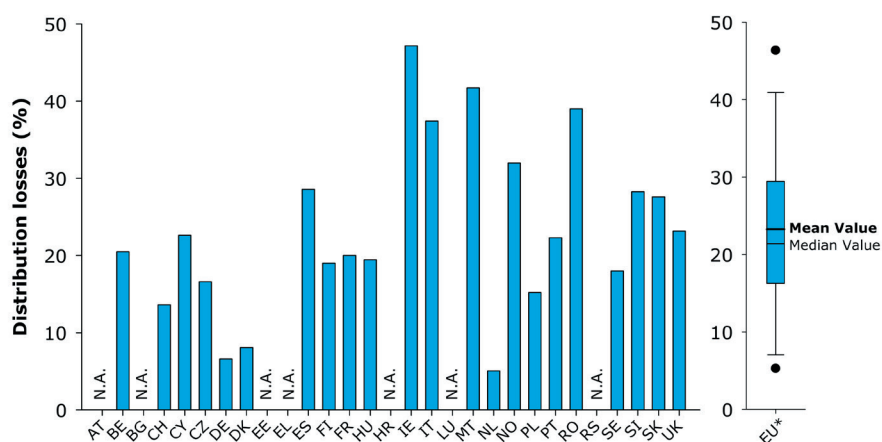


Figura 2. Pérdidas por distribución de agua en los países de la CE en el período 2012-2015 <https://www.eureau.org/resources/publications/1460-eureau-data-report-2017-1/file>

Un aspecto clave de la explotación de plantas MHP en las redes de agua está representado por la mejor tecnología disponible (MTD) que se utilizará en las plantas. La elección está relacionada con una serie de condiciones y restricciones de diseño. Una red de distribución de agua (RDA) se puede dividir en una red de transmisión o transporte de agua (TA) y una red de distribución de agua (DA), como se muestra en la Figura 3. En la parte TA de la red, el agua se transfiere desde el manantial a varios depósitos de almacenamiento ubicados en las proximidades de cada población; en una red bien diseñada, el caudal y la caída disponible para la producción de energía tienen fluctuaciones diarias limitadas y la potencia disponible es frecuentemente mayor de 20-30 Kw. En su lugar, en redes de DA, el agua se transfiere desde el depósito de almacenamiento a los usuarios finales mediante un complejo sistema de tuberías; el caudal y la caída disponible para la producción de energía tienen grandes fluctuaciones diarias, determinadas por la demanda de los usuarios, por lo que la potencia disponible suele ser inferior a 10 Kw. MHP en las redes de TA se puede realizar utilizando los criterios de diseño de mini-centrales hidroeléctricas, incluyendo las turbinas tradicionales como DPE. El único problema está representado por la complejidad de la conexión a la red eléctrica y por la ausencia de usuarios de energía en el punto de producción. Por el contrario, las plantas micro y pico-hidroeléctricas en redes de DA tienen un diseño completamente diferente, por la necesidad de reducir los costes de la planta, como consecuencia de ingresos muy reducidos debido a la baja producción energética. Además, la producción de energía no representa el objetivo principal de los gestores de las redes de DA, siendo la fiabilidad de la red el aspecto más importante del transporte y distribución de agua.

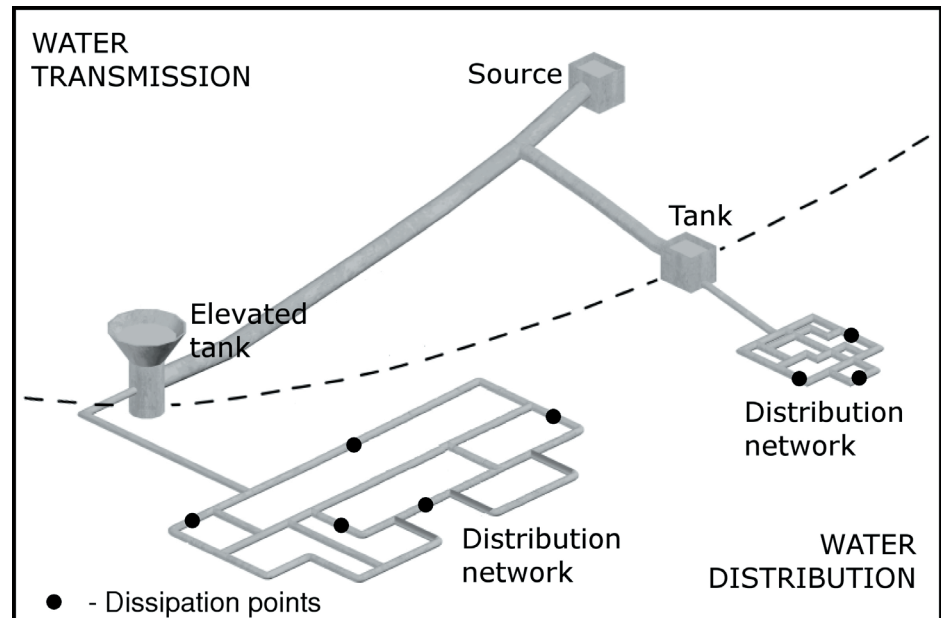


Figura 3. Esquema de un sistema de distribución de agua

En conclusión, el diseño de un MHP en la red de DA se ve forzado por los siguientes factores:

- la ubicación de la instalación MHP no está determinada por el impacto económico de la propia planta, sino por el impacto económico de una estrategia de gestión más compleja;
- el coste específico de la instalación MHP debe reducirse, en comparación con las plantas tradicionales, debido a la pequeña potencia disponible;
- la principal preocupación del gestor del agua es la fiabilidad del sistema y la tecnología del MHP también tiene que ser fiable;
- la falta de un posible uso de la energía producida es con frecuencia una limitación real para la construcción de la instalación MHP.

3. Potencial de MHP en redes de la AA

El proyecto REDAWN ha cuantificado el potencial de recuperación de energía de las redes de suministro de agua en la Zona Atlántica (AA). Este estudio se realizó para los diferentes sectores (abastecimiento, riego e industria) y ha requerido de una investigación detallada del exceso de energía hidráulica disponible en las redes de la AA a escala local, una estimación del exceso de energía extrapolando de escala local a escala regional, una evaluación de la eficiencia de la mejor tecnología disponible (MTD) para MHP y un cálculo del potencial de recuperación de energía a escala nacional. Este trabajo tiene un gran valor para una explotación de tecnología MHP, en todos los aspectos: producción de dispositivos, gestión de redes y desarrollo de políticas.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo del procedimiento utilizado para la evaluación del potencial de recuperación de energía en el sector del regadío. A partir de la topología de un número determinado de redes de riego, se realiza un diseño preliminar de MHP y se estima el potencial de recuperación de energía. Luego, mediante una función de transferencia calibrada con las características de cultivos y clima, esos resultados se extrapolaron a escala regional. Se desarrolló una metodología similar para las redes de distribución de agua para abastecimiento urbano, a partir de datos reales de energía disipada en válvulas reductoras de presión (PRVs). La Figura 5 muestra el potencial de recuperación de energía en redes de agua potable de Irlanda, Irlanda del Norte, Escocia y Gales. Para el sector industrial, el potencial de la tecnología MHP se estimó mediante el análisis de la altura disponible en el colector de salida de las Estaciones depuradoras de aguas residuales, así como del caudal procedente de las autorizaciones de vertidos mediante el cálculo de la producción de energía correspondiente.

Potencial de MHP en
redes de la AA

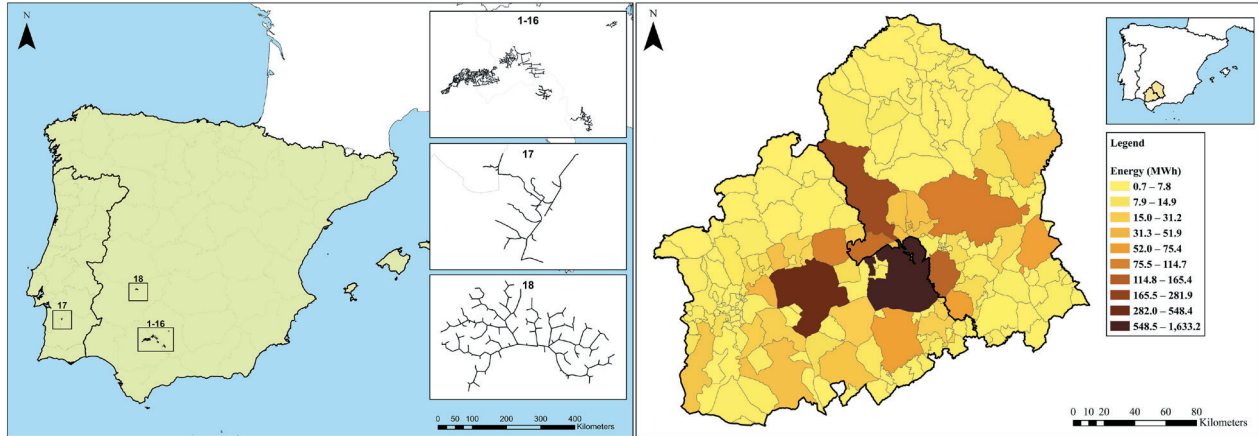


Figura 4. Evaluación del potencial MHP en redes de riego de Andalucía (España)

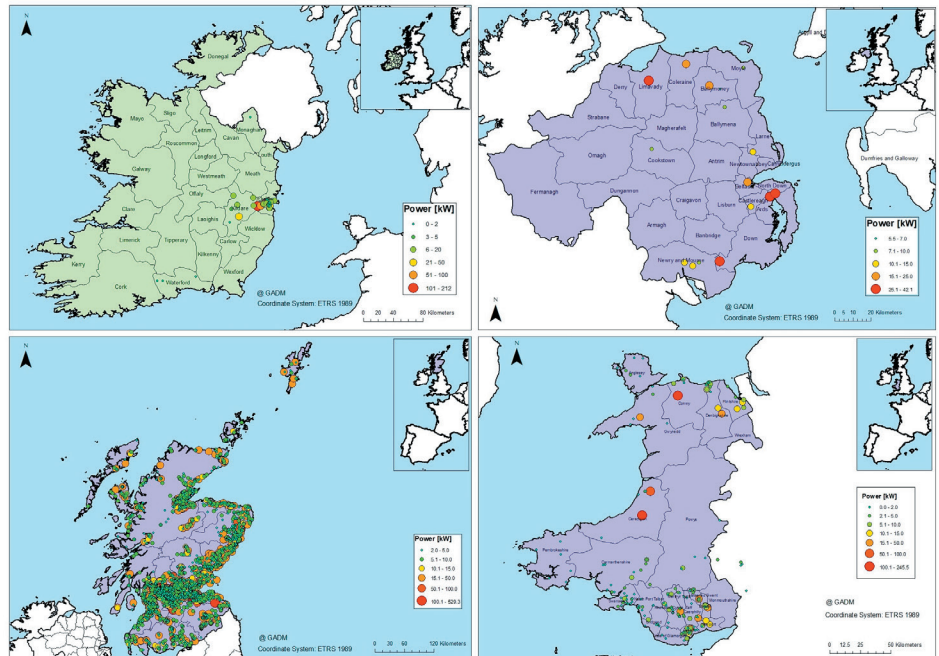


Figura 5. Evaluación del potencial del MHP en las redes urbanas de agua del norte de AA

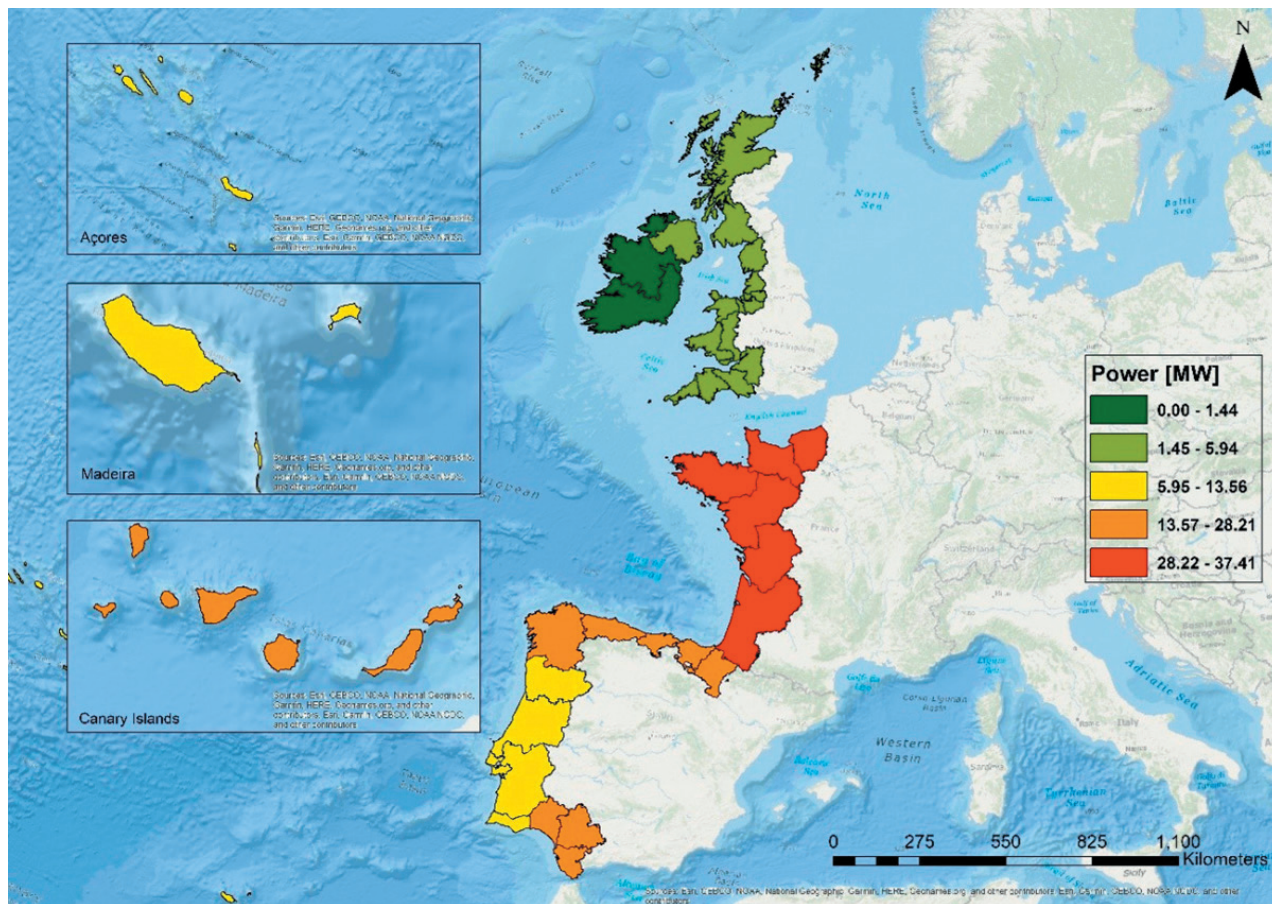


Figura 6 Potencial total de recuperación de energía estimado para toda la región de AA

En la Figura 6 se representa el potencial total de recuperación de energía estimado para toda la región de AA. Los datos se compilan en una plataforma SIG que muestra la distribución espacial de los recursos energéticos recuperables en el AA. Los datos también están disponibles en la página web de REDAWN.

4. Uso de la energía

El último factor que se ha mencionado en la introducción, el uso de la energía debe considerarse como el punto de partida para el diseño de una instalación MHP. Sin una idea clara del valor potencial de la energía que se puede recuperar y utilizar es imposible hacer un estudio de viabilidad adecuado, dado que no se tienen datos de los posibles ingresos de la planta MHP. Considerando que la energía eléctrica generada tiene que ser utilizada posteriormente, en el proyecto REDAWN se han identificado y estudiado varios esquemas no convencionales para el uso de energía.

Existen las siguientes opciones para el uso de la energía en las redes de distribución de agua:

1. producción de energía para inyección a red
2. producción de energía para autoconsumo
3. producción de energía para monitorización y control de las redes
4. suministro de energía a un sector de la red
5. suministro de energía a la red de aguas residuales
6. recuperación de energía en la cadena de suministro de agua

Producción de Energía con conexión a red

Esta es la solución clásica para la instalación de una planta MHP. En este caso, el dispositivo de producción de energía (DPE) puede equiparse con un generador asincrónico y la energía recuperada en la planta puede inyectarse a la red eléctrica. Esta solución es posible en las redes de abastecimiento de agua potable de zonas urbanizadas por la proximidad a la red eléctrica. La potencia instalada

en las instalaciones MHP en las redes de abastecimiento suele ser pequeña en comparación con la energía eléctrica distribuida por la red eléctrica a los usuarios finales, esto hace que la conexión a red sea muy fácil, por la estabilidad de la forma de onda eléctrica y la demanda energética de la red.

En este tipo de MHPs el objetivo principal del diseño es la restricción dada por la empresa que gestiona las redes de agua de asegurar la presión requerida aguas debajo de la instalación . El objetivo secundario es la fiabilidad de la planta y el tercero es la viabilidad de la planta.

Producción de Energía para autoconsumo

Cuando la planta MHP se instala en una parte periférica de la red de abastecimiento de agua o en una zona rural o aislada de una red de riego, la conexión a la red eléctrica es con frecuencia imposible o no es viable económicamente. En este caso, la mejor alternativa es encontrar un uso local de la energía. Obviamente, que coincidan las ubicaciones de la planta MHP y las demandas de energía no es fácil. Con frecuencia, este emparejamiento se obtiene, pero la potencia absorbida por el usuario final es menor que la que puede producir la planta MHP, y por tanto el tamaño de la planta tiene que ser reducido para adaptarlo a la demanda de energía.

Una alternativa puede ser la creación de una nueva actividad comercial en el lugar de la planta MHP utilizando la energía a una tarifa adecuada. Como ejemplo, la energía recuperada en la planta podría utilizarse para cargar baterías de diferente potencia, desde baterías del tamaño de un coche, que requieren unos pocos Kw, hasta baterías de teléfono, que requieren menos de 100 w.

Producción de Energía para monitorización y control de WDN

Con el aumento en control y automatización de las redes, existe la necesidad de suministrar energía a pequeñas estaciones ubicadas en puntos concretos de la red, donde se miden las principales variables hidráulicos como el caudal y presión. Los datos se envían a un centro de procesamiento centralizado y permite controlar las válvulas a distancia si están motorizadas. Estas estaciones de monitorización, cuando se encuentran en un sitio remoto o aislado, no están conectadas a la red eléctrica y necesitan suministro de energía. La potencia requerida por estas estaciones es pequeña y no justifica la construcción de una planta MHP convencional. Por lo tanto, hay algunas tecnologías específicas que están disponibles para convertir una pequeña fracción de la energía hidráulica en energía eléctrica para satisfacer el requerimiento de energía de las estaciones de monitoreo y control de las redes.

Suministro de Energía a un sector de la red

No es inusual en las redes de distribución de agua la necesidad de suministrar agua a un pequeño sector situado a mayor cota que el resto de la red. El agua se suministra a estas áreas mediante estaciones de bombeo que toman agua de uno de los depósitos ubicados a lo largo de la red de distribución. La corriente principal llega al depósito con una energía residual que simplemente se disipa. En estos casos es posible recuperar esta energía mediante la creación de una planta especial de recuperación de energía que transfiere directamente la energía residual de la corriente principal a una corriente menor que va destinada a un sector más pequeño pero que requiere de un rebombeo para el suministro de agua. La conversión se produce de una situación de baja presión y alto caudal a otra con alta presión y bajo caudal. En estos casos, es posible aumentar la eficiencia global de la planta mediante un acoplamiento directo del

dispositivo de producción de energía con la bomba. Otra ventaja es la reducción del coste de la planta.

Suministro de Energía a la red de aguas residuales

Otra oportunidad para el uso de la energía podría estar presente cuando el nudo o punto con exceso de presión se encuentra cerca de una estación de bombeo de aguas residuales. Estas estaciones se ubican en los puntos bajos de la red de drenaje con el fin de alcanzar la elevación del colector principal de la red de aguas residuales. En presencia de una estación de bombeo de aguas residuales cerca de un punto con exceso de presión en la red de agua potable es posible recuperar la energía de la red de abastecimiento mediante el acoplamiento de la instalación de una planta MHP con la bomba de aguas residuales, reduciendo la demanda de energía de la red de aguas residuales con pequeños costes de inversión.

Recuperación de Energía en la cadena de suministro de agua

La recuperación de energía con plantas MHP podría suponer un valor añadido importante en la definición de nuevas estrategias de suministro de agua con menor impacto ambiental. El suministro de agua mediante bombeo directo es una estrategia para garantizar un valor de presión óptimo en la red, como alternativa al uso de depósitos de agua elevados o depósitos con nivel de presión fijo. En la definición del beneficio económico y medioambiental de un bombeo directo, la alternativa de la recuperación energética aguas abajo del depósito elevado debe analizarse en profundidad. En muchos casos, los ingresos de la planta MHP podrían alterar el equilibrio de los beneficios entre las dos opciones. También en presencia de plantas de tratamiento aguas arriba en la red, como en el caso de las plantas desalinizadoras, la recuperación de energía con instalaciones MHP puede implicar una reducción importante de los costes del agua.

5. Tipos de dispositivos de producción de energía

La descripción de los dispositivos de producción de energía (DPE) en el mercado, o en fase avanzada de pruebas, se puede hacer teniendo en cuenta las aplicaciones antes mencionadas. Hemos clasificado las máquinas que se pueden utilizar en instalaciones MHP de las redes de suministro de agua en cuatro familias:

- Turbinas tradicionales;
- DPE de baja potencia/alta producción;
- DPE de baja potencia/baja producción;
- Turbo-compresores.

Tipos de dispositivos de producción de energía

Turbinas tradicionales

Las turbinas clásicas Francis, Pelton o Banki se utilizan con frecuencia en redes de transporte de agua (Figura 7). El primer tipo de turbina se utiliza en plantas de energía ubicadas a lo largo de una tubería de transporte, cuando se requiere una presión mínima aguas debajo de la turbina. Aunque las turbinas y generadores Francis están disponibles en el mercado para potencias pequeñas de aproximadamente 20 Kw, no es hasta potencias de 40-50 Kw donde son viables económicamente. Junto con el coste del DPE, debe considerarse el coste de un sistema de control complejo, permitiendo la apertura automática de una tubería de derivación en caso de mal funcionamiento de la turbina o en presencia de una anomalía en la red eléctrica.

Una turbina Pelton o Banki podría ser la solución óptima para recuperar la energía residual al final de una tubería de transporte, cuando no se requiere una presión mínima aguas abajo de la turbina. La primera turbina es adecuada para presiones medias - altas, mientras que la segunda para pequeñas - medias.



Figura 7. Turbinas tradicionales para su uso en WT (desde la izquierda turbinas Francis, Pelton y Banki)

DPEs de baja potencia/alta producción

En la parte de distribución de agua en baja de la red, la potencia disponible suele ser menor de 10 kW y los DPE deben satisfacer una serie de aspectos diferentes:

- maximizar la producción de energía;
- reducir la presión a un valor de consigna;
- minimizar el coste de la planta;
- maximizar la fiabilidad de la planta.

Estas expectativas se pueden cumplir más fácilmente en los ramales principales de la red, donde la potencia instalada está más cerca del máximo que en las partes periféricas de la red, donde la potencia instalada se reduce, en el mejor de los casos, a pocos kW.

Actualmente están disponibles los siguientes DPE:

Bombas como turbinas (PAT) son bombas tradicionales utilizadas en modo inverso (Figura 8). Se trata de la DPE más difundida para alta potencia / alta producción en RDA. Por la geometría fija del impulsor y la ausencia de control de flujo interno, el uso de la PAT debe combinarse con un sistema de regulación. Las ventajas son el bajo coste, la alta fiabilidad y la difusión en el mercado. La desventaja es la limitada eficiencia de la planta. El concepto PAT se ha in-

cluido recientemente en algunos productos industriales, proporcionando soluciones compactas con PATs completamente sumergidas o con funcionamiento reversible de bomba/PAT.



Figura 8. Bomba como turbina en planta piloto REDAWN

LucidPipe™ Power System (Figura 9) es una turbina hidroeléctrica esférica que genera electricidad, operando en una tubería de gran diámetro (24” - 60”). Cada módulo extrae una pequeña fracción de la presión de flujo, pero se pueden instalar más módulos en serie. La amortización del proyecto es de 10 años, es decir, bastante alta. Las aplicaciones de la tecnología en Riverside California y Portland Oregon (EE.UU.) pueden leerse en (Team, Purdue ECT, “LUCID-PIPE™ POWER SYSTEM” (2016). ECT fichas informativas Paper 224. <http://dx.doi.org/10.5703/1288284316353>). Las ventajas son la instalación en línea y el riesgo limitado de los transitorios hidráulicos. Las desventajas son la gran extensión que ocupan los distintos

módulos del DPE y el alto coste.

Saint-Gobain PA desarrolló una micro-turbina para la red de tuberías de suministro de agua potable, Figura 10. Un prototipo de la turbina, de 26 kW de potencia, fue instalado en 2017 en una planta de producción de agua potable en Annonay (Fr), aunque no se dispone de información adicional sobre la tecnología. Las ventajas son la instalación en línea. La desventaja está en la falta de información sobre la eficiencia y datos del diseño.

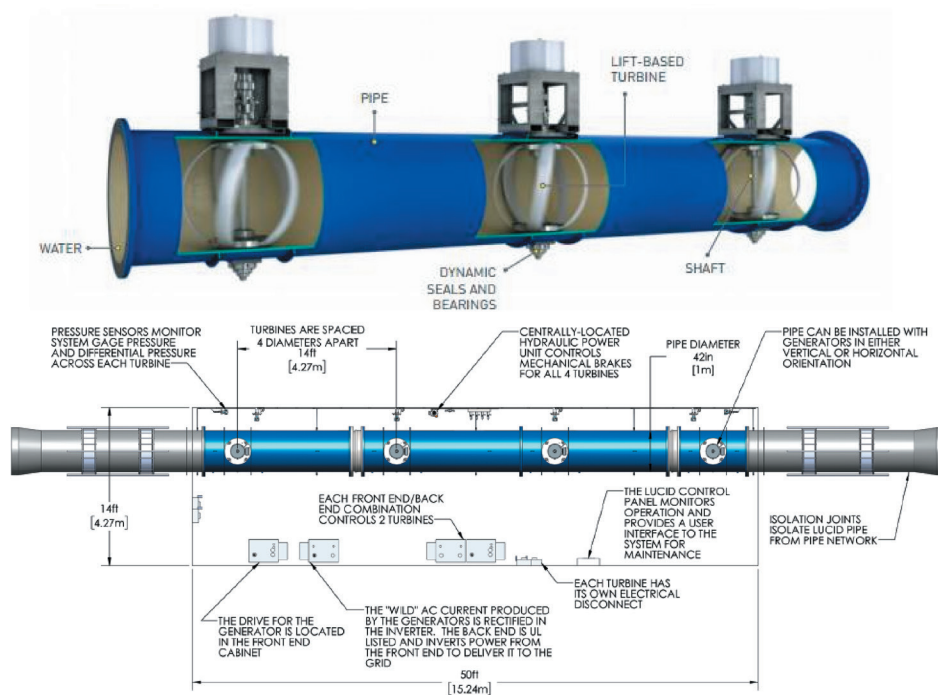


Figura 9. Sistema de alimentación Lucidpipe™

LucidPipe™ Diameter (in)	Rated Power (kW)	Rated Flow (MGD)	Gauge Pressure Required for Rated output (psi)	Head Extraction at Rated (psi)	Head Extraction at Rated While Stopped (psi)	Operational Head Loss Coefficient (Running /Stopped)
24	14	24	48	5.2	1.2	6.7-8.4/2.0
42	50	64	43	5.9	1.1	7.7-10/2.3
60	100	128	43	5.0	1.2	7.7-10.1/2.3

Tabella 1. LucidPipe™ Visión general de los datos de energía

Una versión presurizada de las turbinas Pelton también está disponible para RDA. Una turbina Pelton tradicional se instala en una cámara cerrada y la presión del aire en la cámara se impone que sea igual a la presión requerida aguas abajo. Debido al arrastre o entrada de aire con el chorro de agua, se requiere un sistema de ventilación externo para mantener la presión en la cámara. Hay configuraciones especiales de la carcasa que se pueden utilizar para minimizar el flujo de aire en la turbina Pelton (M. Kramer, S. Wieprecht, K. Terheiden, Minimising the air demand of micro-hydro impulse turbines in counter pressure operation Energy, Volumen 133, 2017). La ventaja es la alta eficiencia de la turbina. La desventaja está en la complejidad de su manejo.

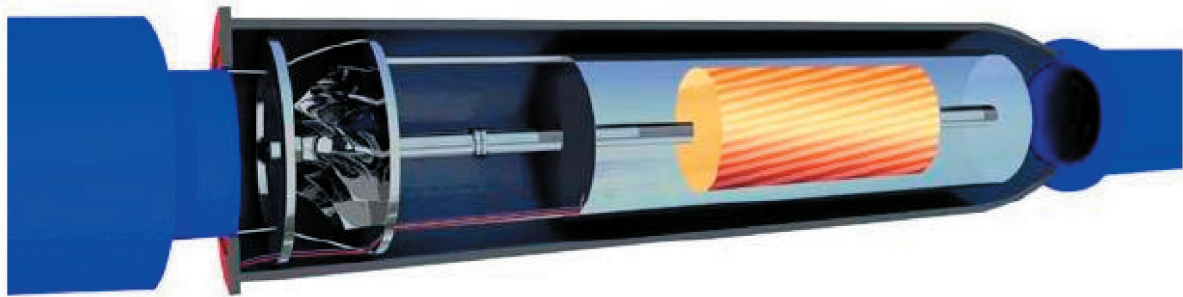


Figura 10. Microturbina Saint-Gobain PAM

También se dispone de una serie de tecnologías prometedoras en una fase avanzada de pruebas. Estos nuevos DPE tratan de superar algunas de las desventajas de las tecnologías existentes.

Una Banki-Mitchell presurizada es una variante prometedora de las turbinas clásicas para canales, Figura 11. La corriente se ve obligada a pasar dos veces a través de los álabes del rodete del DPE, resultando una buena transferencia de energía y una alta eficiencia en una amplia gama de caudales. En la actualidad la tecnología no se produce de forma industrial y el coste de la unidad es alto (Nivel de desarrollo 6 sobre 10).

La hélice tubular es un DPE con una configuración especial de la tubería para albergar una turbina de hélice, Errore: sorgente del riferimento non trovata. La turbina de hélice ofrece una sección de paso libre a la corriente con una eficiencia apreciable, que podría aumentarse en grandes plantas utilizando la geometría de álabes variable. La tecnología no está totalmente desarrollada (Nivel de desarrollo 4 sobre 10).

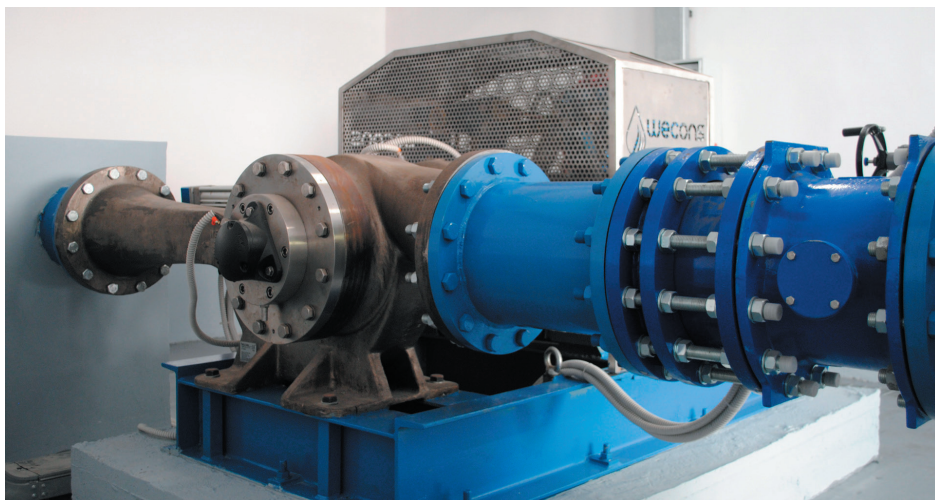


Figura 11. Banki-Mitchell presurizado

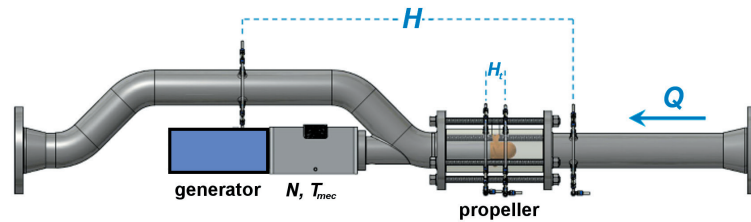


Figura 12. Tubular propeller

La turbina pico-centrífuga es un nuevo DPE para conducciones de agua. Los experimentos han sido realizados por el Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST) durante el proyecto REDAWN, con el fin de obtener una mejor caracterización de la tecnología, Figura 13. La tecnología no está totalmente desarrollada (Nivel de desarrollo 4 sobre 10)

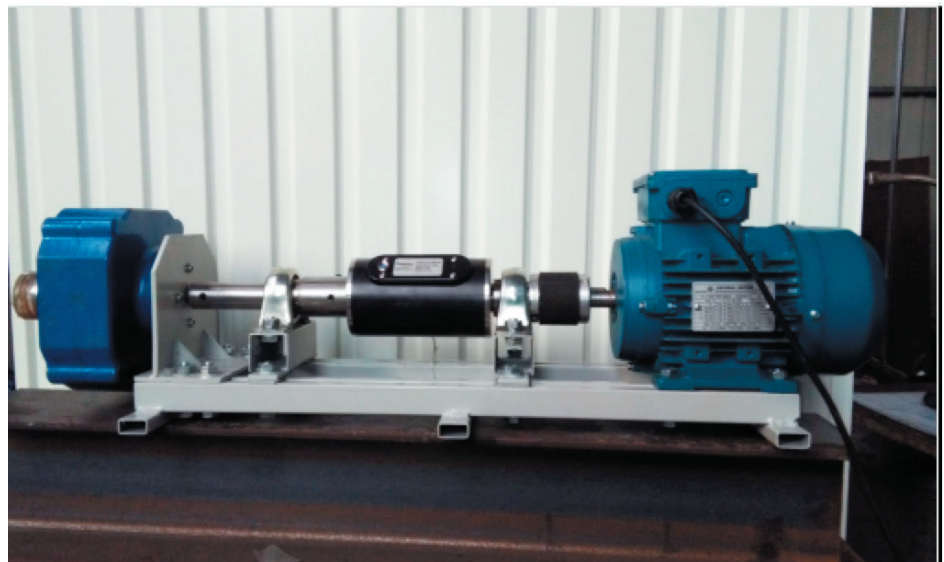


Figura 13. Turbina pico-centrífuga

El amplificador o acelerador de Energía (Energy booster) es una solución compacta para la producción de energía en RDA reduciendo los costes de instalación de la planta, Figura 14. Una o más bombas de sondeo que trabajan en modo inverso se alojan en un propulsor, y se utilizan válvulas neumáticas para ajustar el flujo entre las PAT y el by-pass, con el fin de maximizar la energía producida y obtener la presión requerida aguas abajo. La tecnología no está totalmente desarrollada (Nivel de desarrollo 4 sobre 10).

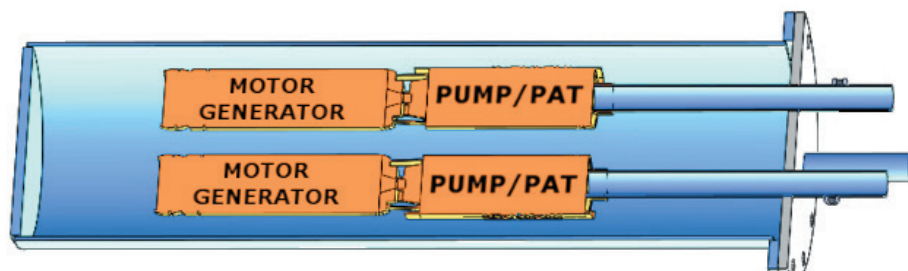


Figura 14. Amplificador Energy

DPEs de baja potencia/baja producción

Las DPE pertenecientes a esta familia se crean para extraer sólo una pequeña fracción de la energía hidráulica de la corriente. La energía producida se utiliza para suministrar a estaciones de monitorización y control a lo largo de la red.

Están disponibles los siguientes DPE:

La turbina Picogen es un DPE compacto con un único elemento giratorio, representado por una hélice junto con un alternador. El DPE tiene el mismo diámetro que la conducción, Figura 15. En un conducto de 200 mm con un caudal medio de 100m³/h, se puede instalar una turbina Picogen de 25 W, produciendo una caída de presión de 0,06 bar. Picogen está totalmente desarrollada.

Greenvalve es una turbina de ruedas alojada en el elemento de cierre de una válvula de bola con un generador externo, Figura 16. La energía se produce con la válvula parcial o completamente abierta, sin caídas de presión adicionales. La energía producida se utiliza para el control de la propia válvula y para dispositivos de monitorización. La tecnología no está totalmente desarrollada o comercializada (Nivel de desarrollo 4 sobre 10).

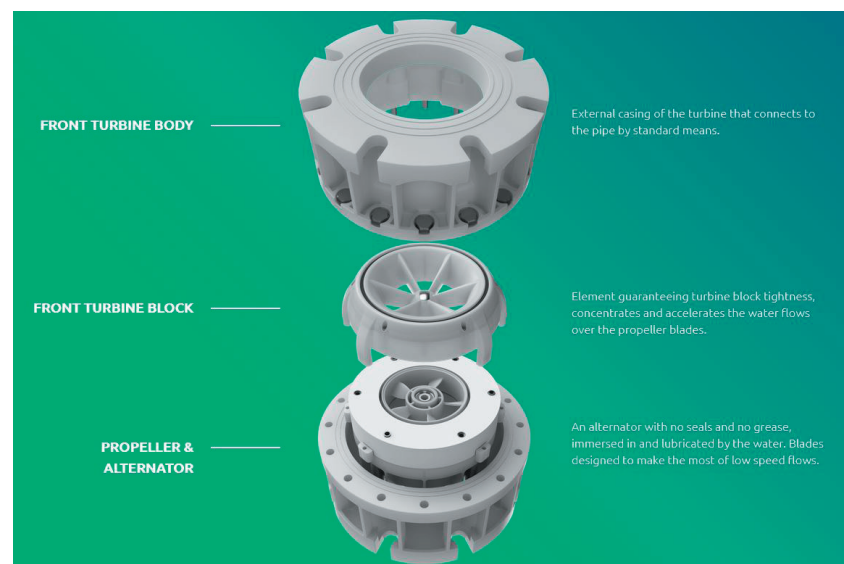


Figura 15. Turbina Picogen

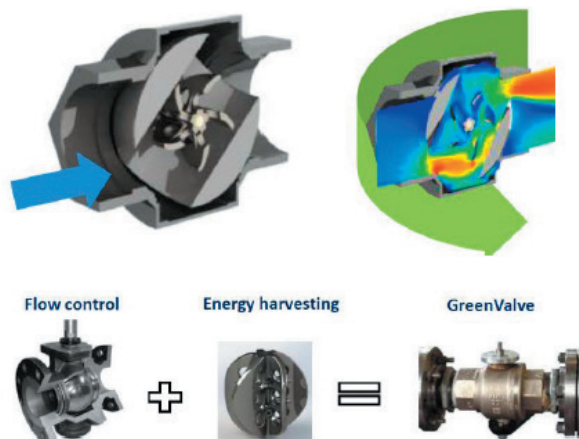


Figura 16. Greenvalve

También hay una serie de pico turbinas para pequeñas potencias. Estos DPE se instalan en una tubería de derivación. Se venden en combinación con el dispositivo de monitoreo o control. Por ejemplo, el Generador de Potencia Intermedia X143IP, producido por Claval, se puede montar en una válvula de control automática como la representada en la Figura 17.

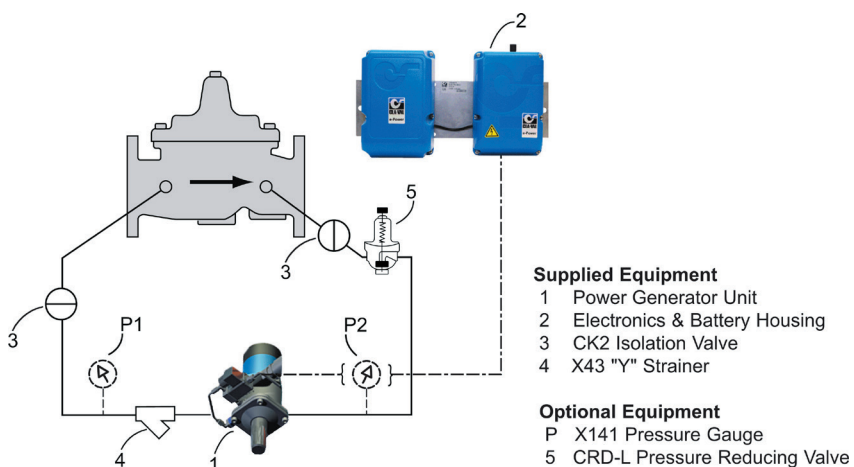


Figura 17. X143IP generador de potencia intermedia producido por Claval

Turbocompresores

Estos dispositivos se crean para transferir la energía hidráulica de una corriente o flujo a otro. Esta solución tiene una mayor difusión en otros sectores industriales, como en la ingeniería naval o en las desaladoras. Por lo tanto, los turbocompresores se pueden encontrar en el mercado con un diseño, eficiencia y costes muy diferentes en función del uso.

El acoplamiento directo de un PAT con una bomba es la solución más barata, perfectamente viable para las redes de agua, Figura 18. Otra ventaja de este tipo de turbocompresores es la posibilidad de cubrir con las diferentes bombas que hay en el mercado, toda la gama de condiciones de trabajo.

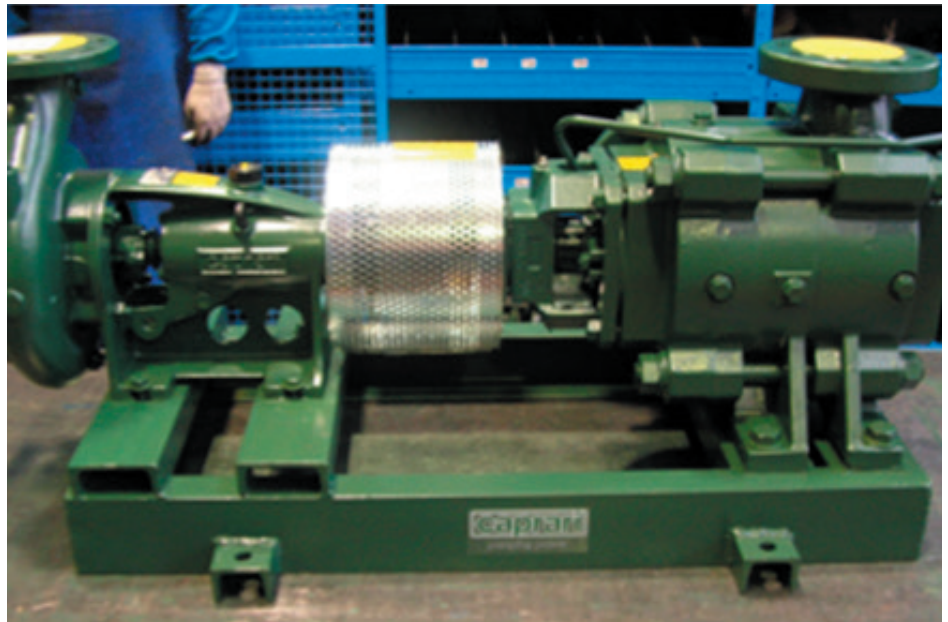


Figura 18. Acoplamiento directo de un PATy una bomba

Los Turbochargers son turbo-compresores contienen la turbina y los impulsores de la bomba en un mismo cuerpo, Figura 19. Estos dispositivos se utilizaron por primera vez a finales de la década de 1980 y se extendió su uso en la década de 1990, pero no están en producción en la actualidad.



Figura 19. Turbocompresor

El intercambiador de presión o los turbocompresores de alta eficiencia son utilizados para recuperar energía en las plantas desalinizadoras, Figura 20. Utilizan dos principios diferentes, basados en un movimiento alternativo del pistón o en un movimiento rotatorio de intercambio de presión. La eficiencia puede llegar a ser de hasta el 98%. El coste de los intercambiadores de presión es demasiado alto para un uso real en las redes de agua.

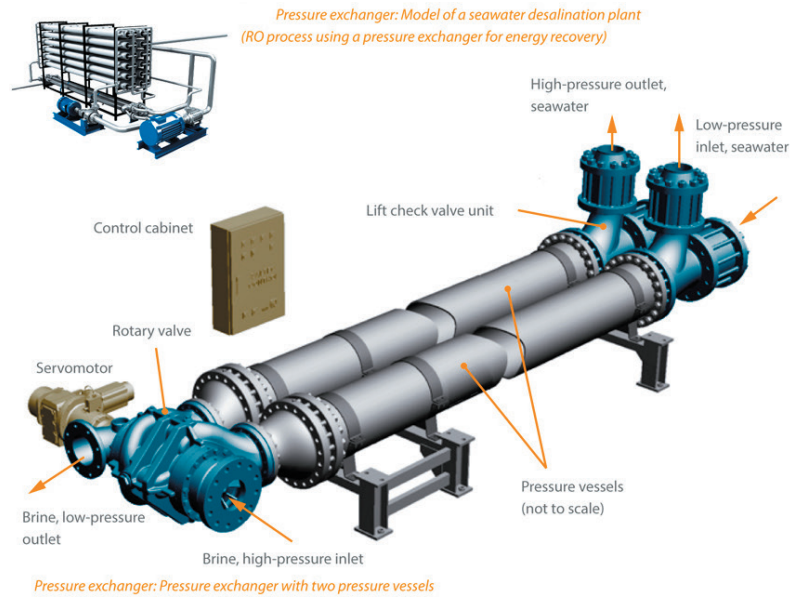
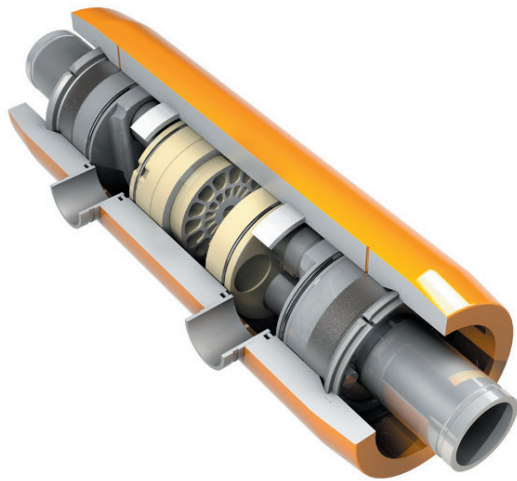


Figura 20. Intercambiadores de presión

6. Datos de la red de distribución

La importancia de crear una gran base de datos sobre el estado hidráulico de la red de agua para los gestores del agua ha sido ampliamente estudiada en la literatura. En la figura 21 se presenta una jerarquía clásica en forma árbol de decisiones para un sistema de suministro de agua.

Cualquier cambio en el estado del sistema debe considerarse como parte de un proceso proactivo, basado en datos de contexto históricos, datos de costes futuros y objetivos, Figura 22. La aplicación de estos procesos de gestión para la localización, diseño e instalación de una planta de MHP podría parecer innecesariamente compleja, pero no es así. A pesar de la importancia de la recuperación de energía, la construcción de las plantas se planifica en general dentro de una estrategia general que considera diversos objetivos importantes. La recuperación de energía se puede considerar como un efecto secundario positivo en una estrategia encaminada a la reducción de la presión para la reducción de fugas. Incluso en el caso de los DPE de baja potencia/baja producción, la distribución de las estaciones de monitorización y control viene determinada por la exigencia de una gestión óptima de la red.

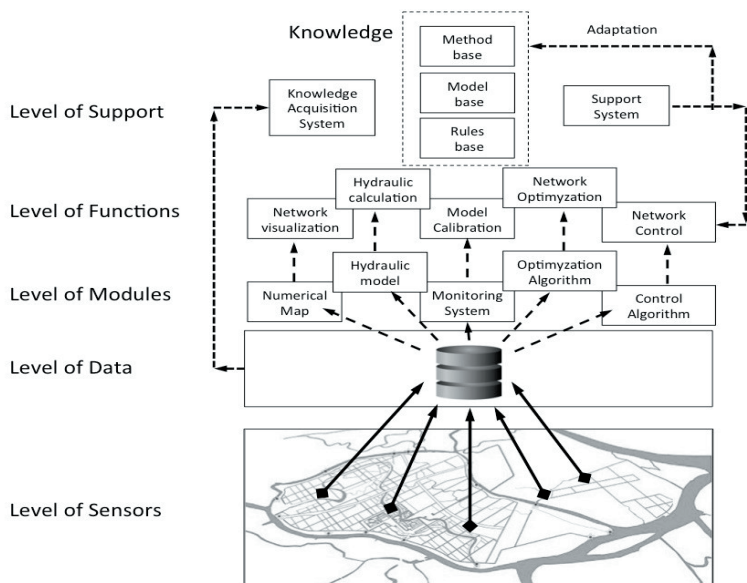


Figura 21. Árbol de decisión en una red de suministro urbano.

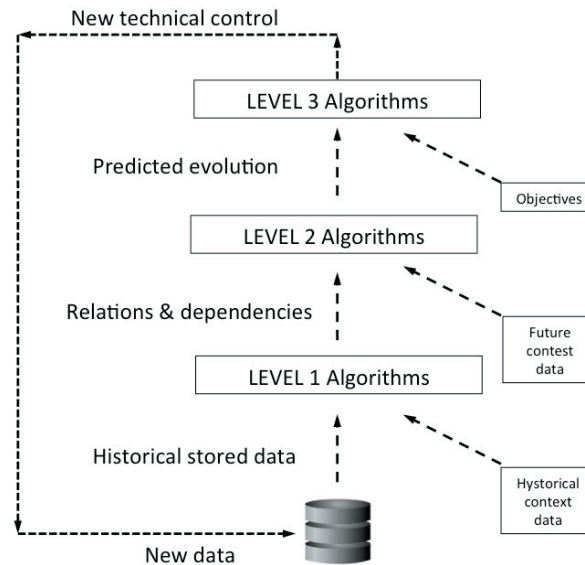


Figura 22. Arquitectura para la modelización y control

Los datos para el diseño de una planta de producción micro-hidráulica (MHP) en una red de distribución de agua deben ser de dos tipos:

1. Datos para realizar el modelo hidráulico de la red;
2. Datos medidos in situ en la red.

El primer tipo de datos se utiliza para la selección de la ubicación y el diseño de las válvulas y las plantas MHP en la red, mientras que el segundo tipo de datos se utiliza para la sustitución de una PRV existente por una instalación MHP. En todos los casos, es importante subrayar que la presencia de la MHP afecta también a puntos de la red situados a gran distancia del nudo de producción, Figura 23. La comprobación del funcionamiento correcto de la instalación debe realizarse con referencia al nudo de mínima presión en la red.

Los caudales y presiones medidos o calculados en el nudo de MHP deben estar disponibles a escala horaria para tener en cuenta la variabilidad de la demanda en la red de distribución. También debe evaluarse el efecto de la variación estacional de la demanda de los usuarios. En la Figura 24 y la Figura 25, se presentan los caudales y las presiones medidos en una PRV de una red de una empresa de abastecimiento en Francia (SMPGA). El salto de energía disponible para la conversión de energía está representado por la diferencia entre los valores de presión aguas arriba y aguas abajo en la válvula reductora de presión (VRP). La base para el diseño de la MHP está representada por los dos gráficos de la Figura 26 y la Figura 27, que representan el gráfico $H(Q)$ y la distribución de frecuencia de la potencia disipada por la PRV.

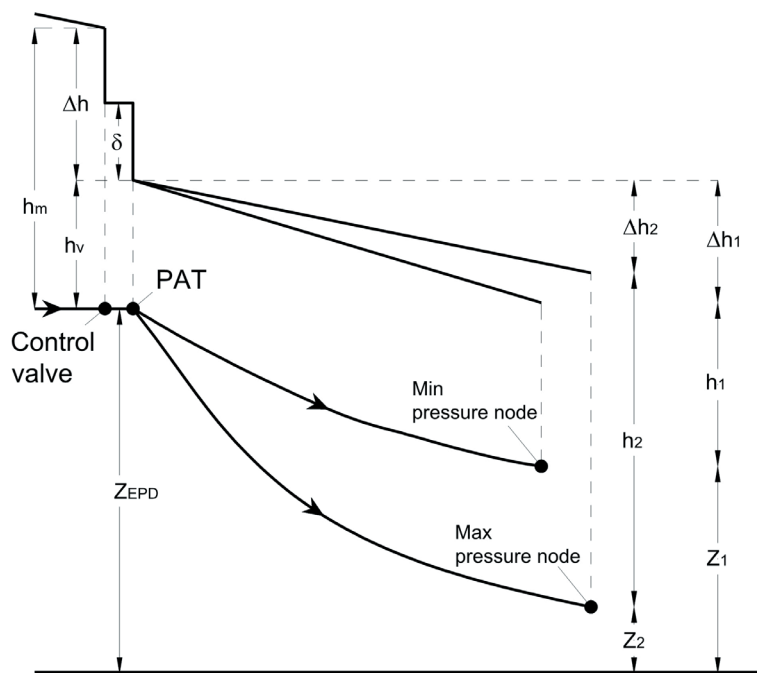


Figura 23. Efecto de una PAT en el nudo de mínima presión.

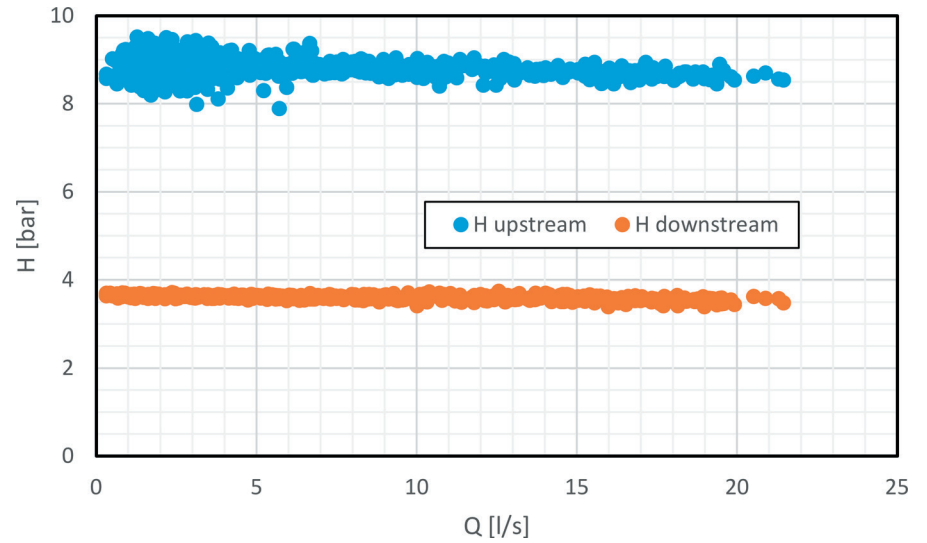


Figura 24. Presiones registradas en una válvular reductora de presión

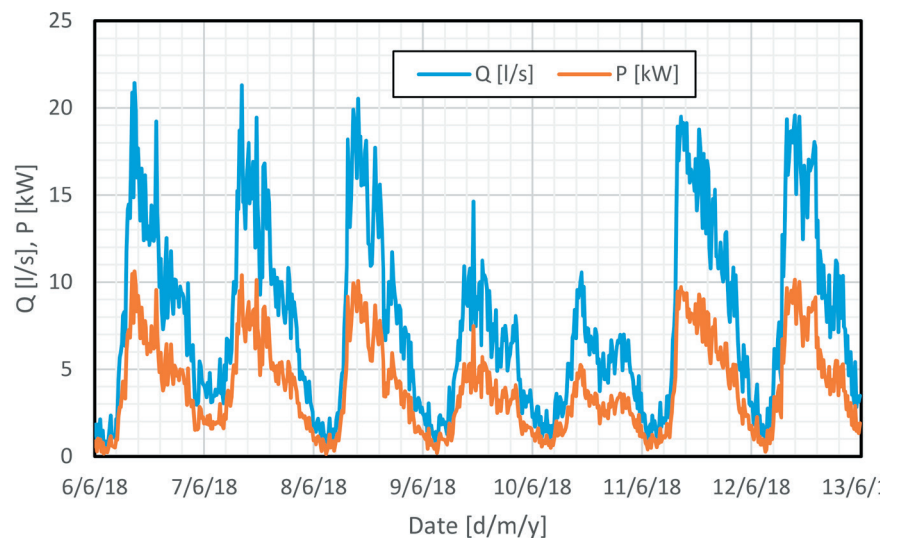


Figura 25. Dsistribución de caudales y potencias disponibles

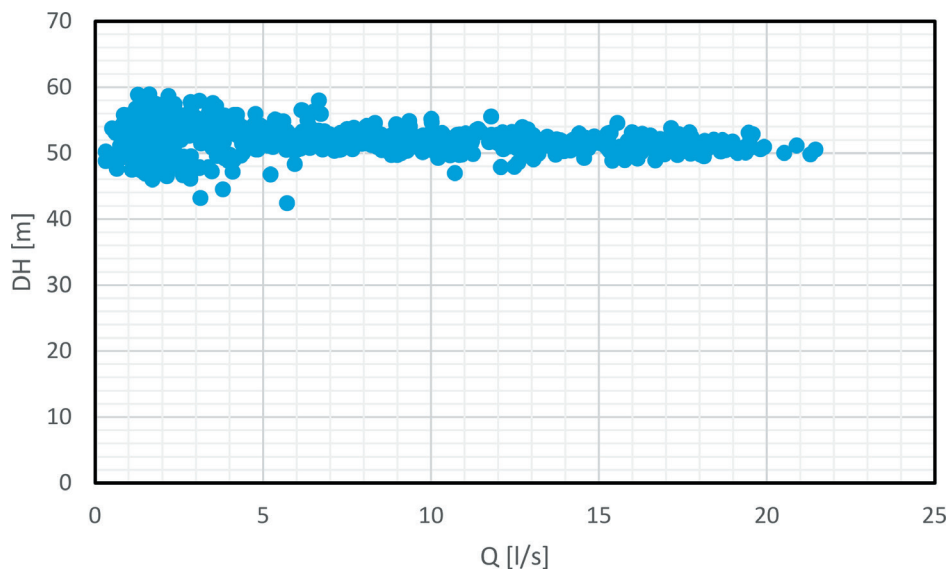


Figura 26. Caída de altura en función del caudal en la válvula reductora de presión

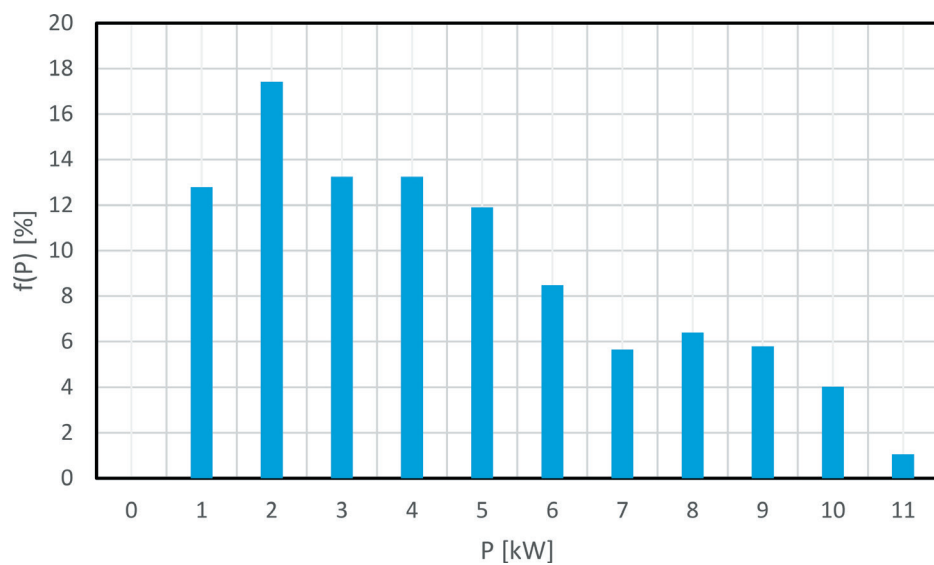


Figura 27. Distribución de frecuencias de la potencia disponible

La mejor solución en términos de funcionalidad de la red debería ser el diseño de una MHP que reemplace la PRV existente en el nudo de producción, con las mismas condiciones de trabajo. De este modo, el proceso de recuperación de energía no modificaría las condiciones hidráulicas de la red. Lamentablemente, los pequeños DPEs descritos en el capítulo 4 no están equipados con un regulador incorporado, como las turbinas tradicionales, y sus curvas características no se ajustan a las condiciones de funcionamiento en el nudo de producción. Esto se muestra en la Figura 28a. La curva característica de un DPE conectado a un generador asíncrono depende del número de polos. Para una velocidad de giro determinada, N , una condición de funcionamiento puede situarse en el plano $H(Q)$ a la izquierda o a la derecha de la curva característica. En el primer caso, el DPE produciría una pérdida de altura inferior a la necesaria para mantener la presión, mientras que, en el segundo caso, la pérdida de altura sería mayor. Sólo ocasionalmente la condición de trabajo de la EPD podría ajustarse a las condiciones de funcionamiento de la red de distribución de agua. Por lo tanto, la sustitución de una PRV por una MHP tiene el efecto de cambiar el estado del sistema, y esta modificación tiene que ser analizada en profundidad para evitar excesos de presión, o presiones por debajo del mínimo en el resto de la red. Para solucionar este problema, se requiere una regulación externa del DPE, para lo que existen tres posibilidades, Figura 29. En la Regulación Hidráulica (HR), se requieren dos válvulas automáticas, la primera en serie con el DPE, y la segunda en una tubería instalada en by-pass. El principio quedará claro observando la figura 28a. La primera válvula produce una caída de carga adicional cuando el punto de funcionamiento se sitúa a la izquierda de la curva característica del EPD. La segunda válvula abre la derivación o by-pass cuando el punto de funcionamiento se sitúa a la izquierda de la curva característica del DPE. En la regulación eléctrica (ER), el punto de funcionamiento de la red de distribución y el punto de trabajo del DPE se adaptan variando la velocidad de rotación del DPE con el

uso de un inversor, Figura 28b. Por último, también es posible una regulación combinada (HER), Figura 28c.

Para las grandes fluctuaciones de caudal y caída de presión en sistemas de distribución, determinadas por la variabilidad de la demanda de los usuarios, la variación únicamente de la velocidad del DPE no es suficiente para cubrir todo el rango de condiciones de operación. Por lo tanto, sería necesario un sistema de regulación mixto (hidráulico y eléctrico). Estudios previos han demostrado que el aumento de la producción de energía en una planta (MHP) obtenido con regulación eléctrica (HER), en comparación con el uso de la regulación hidráulica (HR), no es lo suficientemente grande como para amortizar los mayores costes de la planta.

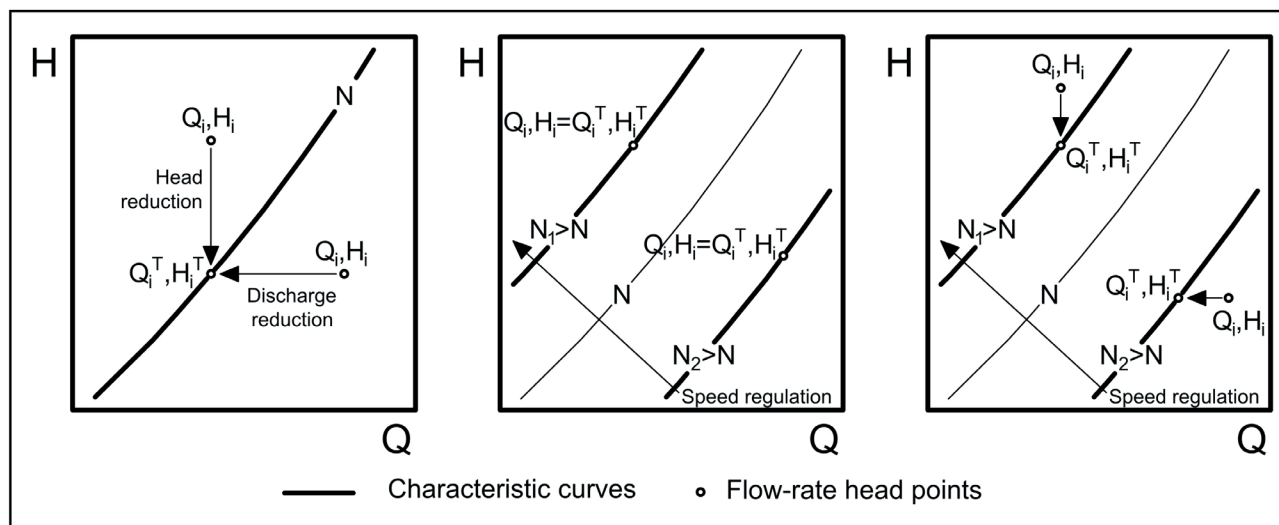


Figura 28. Regulación de una planta micro-hidráulica en diferentes casos

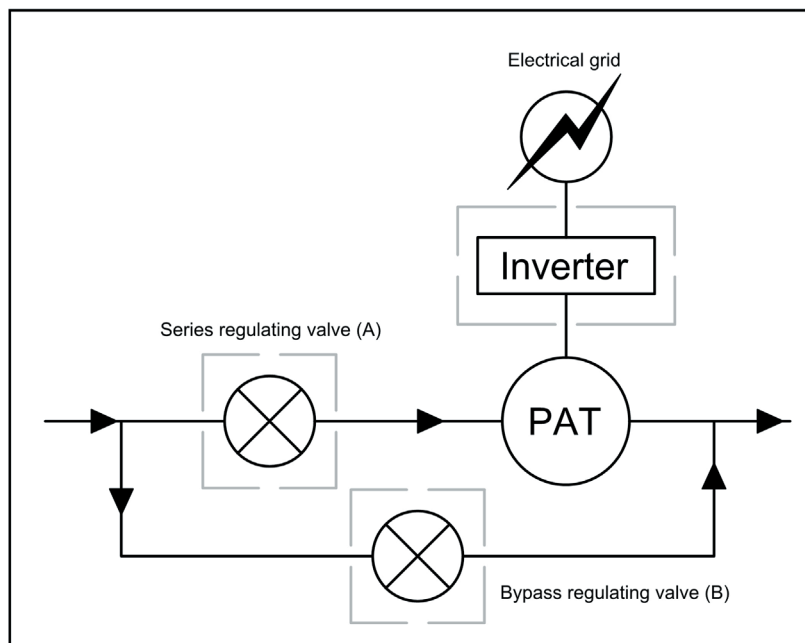


Figura 29. Esquema de una planta hidráulica de recuperación de energía en redes

7. Principios del diseño de una planta micro hidráulica (MHP)

En el diseño de la MHP prevalecen los siguientes aspectos: la fiabilidad, el coste unitario y la disponibilidad de los datos de diseño. Sólo en el caso de los dispositivos de producción de energía de baja potencia/baja producción estos aspectos adquieren escasa relevancia, ya que la presencia de la MHP no afecta significativamente al estado de la red, y la elección puede realizarse en base a las necesidades de la estación de monitorización y control. Por su alta fiabilidad y su bajo coste, las PATs pueden ser una opción más interesante.

Selección de la PAT en una instalación convencional

Una de las limitaciones para el uso de la tecnología PAT es el hecho de que los fabricantes de bombas no publican en sus catálogos las curvas características y de rendimiento de la bomba funcionando en modo inverso. Por lo tanto, muchos estudios previos se han centrado en la estimación teórica de las condiciones de funcionamiento de la PAT a partir de las condiciones de trabajo de la bomba. El proyecto REDAWN ha intentado superar este problema creando una base de datos de PATs comerciales para simplificar la elección de la PAT y fundamentar el diseño de la instalación MHP sobre una base más sólida. La base de datos contiene las curvas características de las bombas comerciales que funcionan en modo directo o inverso. En la web de REDAWN hay un código que permite acceder fácilmente a la base de datos.

El segundo aspecto en el diseño está representado por la elección del modelo y del tamaño del PAT. La Estrategia Operativa Variable (VOS) es la estrategia de diseño de PAT más difundida en la literatura. La VOS es un algoritmo de selección iterativo, que evalúa el modelo y el tamaño de la PAT que maximiza una función objetivo, normalmente representada por la eficiencia de la instalación MHP, en términos de productividad de la planta y de fiabilidad de los componentes. Se ha creado una aplicación informática, que se ofrece

Principios del diseño de una planta micro hidráulica (MHP)

como herramienta de ayuda a la toma de decisiones en la web de REDAWN, que implementa VOS en la base de datos de las PATs. Partiendo de las condiciones de trabajo de la instalación MHP en un punto seleccionado de la red, y sobre una presión a la salida determinada, se realiza la selección de la PAT y se determina la energía generada por la planta o instalación.

Instalación no convencional

Para el diseño de las instalaciones MHP utilizadas para el suministro directo de energía procedente de una corriente de agua potable a otra corriente de agua (agua potable o residual) es necesaria una metodología diferente. Dentro de REDAWN se ha desarrollado una metodología completa para ambas situaciones, la cual ya está disponible. La transferencia directa se produce mediante un dispositivo especial en el que una PAT se acopla directamente a una bomba y la transmisión mecánica se produce a lo largo del mismo eje de las dos máquinas. Así, la PAT convierte la energía hidráulica disponible en energía mecánica y su eje giratorio se conecta directamente a otra máquina para bombear el agua en otra tubería. El requisito para esta forma de recuperación de energía es la existencia de un punto específico en el que haya un exceso de energía en la tubería principal de la red de suministro de agua y se necesite un suministro de energía en un ramal secundario de la misma red o en un ramal de una red diferente. El primer caso, PAT-Bomba (P&B) se representa en la Figura 30, mientras que el segundo caso, PAT-Bomba Mixta (MP&B), se muestra en la Figura 31. En el primer caso, se puede suponer la misma distribución horaria de los dos caudales y la hora punta de las dos partes de la red coincide. En cambio, en el segundo caso, el patrón de la red de aguas residuales suele estar retrasado y puede existir un desfase entre el pico de demanda en la red de distribución de agua (es decir, el caudal máximo turbinado) y el caudal pico en la red de aguas residuales (es decir, el caudal máximo bombeado).

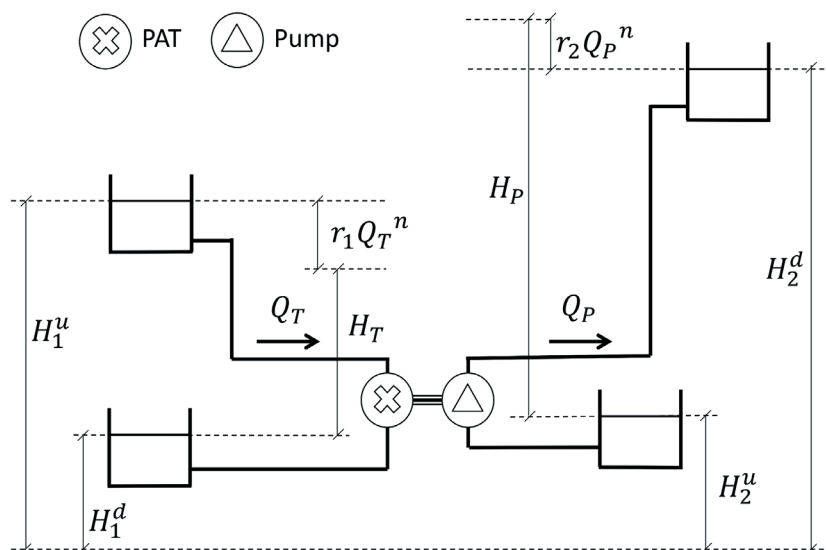


Figura 30. Esquema hidráulico de un sistema PAT-Bomba turbocompresor (P&B).

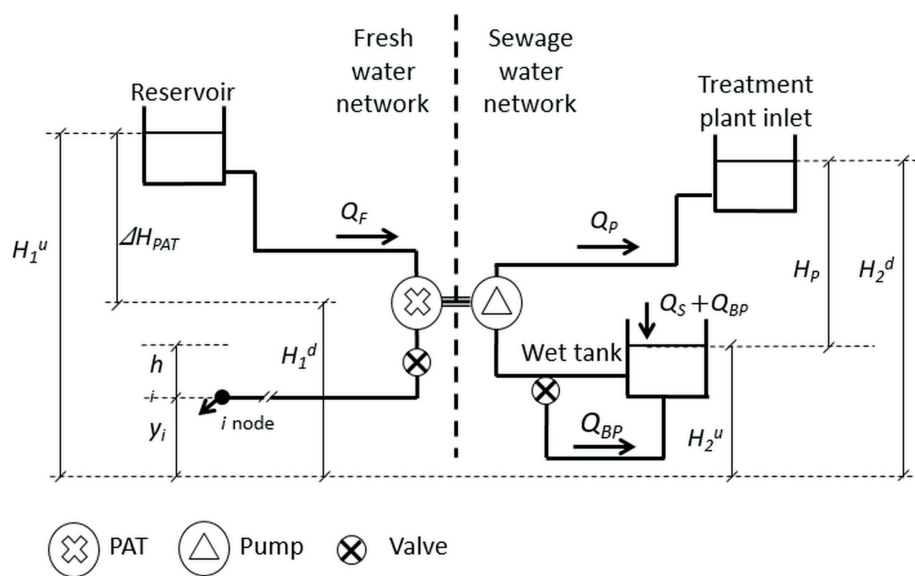


Figura 31. Esquema hidráulico de una PAT- Bomba Mixta (MP&B).

En el primer caso, este tipo de instalación es viable cuando la energía disponible está relacionada con un caudal elevado (Q_T) y una altura de bombeo baja (H_T), mientras que en la segunda parte de la red hay que bombear un caudal menor (Q_p) con una altura de bombeo mayor (H_p). El caso de estudio demostró que se puede bombear hasta un tercio del caudal turbinado ($Q_p/Q_T < 0,33$), mientras que la altura de bombeo puede ser hasta 4,5 veces la altura turbinada ($H_p/H_T < 4,5$). El rendimiento de la conversión de energía puede ser de hasta 0,45, lo que significa que se puede utilizar hasta el 45% de la potencia disponible para bombear el agua en la segunda parte de la red.

El desarrollo teórico de la planta MP&B, en donde se aporta energía desde una corriente de agua potable a una corriente de aguas residuales, se ha realizado íntegramente dentro del proyecto REDAWN en un pequeño pueblo irlandés situado en el condado de Laois, a unos 100 km de Dublín (IE). En la figura 32 se representan las dos redes. En la izquierda, las flechas rojas representan el suministro de agua potable a los usuarios finales. En cambio, en la red de la derecha, las aguas residuales se recogen y siguen las pendientes según las flechas azules. El punto de recogida de la red de aguas residuales coincide con la ubicación de la MHP en la red de agua potable, que se supone a lo largo de la tubería 8-10, sustituyendo una válvula PRV existente. A continuación, desde esta ubicación, las aguas residuales deben bombearse hacia la depuradora. En la figura 33 se muestra el caudal disponible, la altura disponible y la potencia de la planta MHP. El turbocompresor de esta MHP podría representarse mediante una PAT acoplada a una bomba de aguas residuales de eje libre.

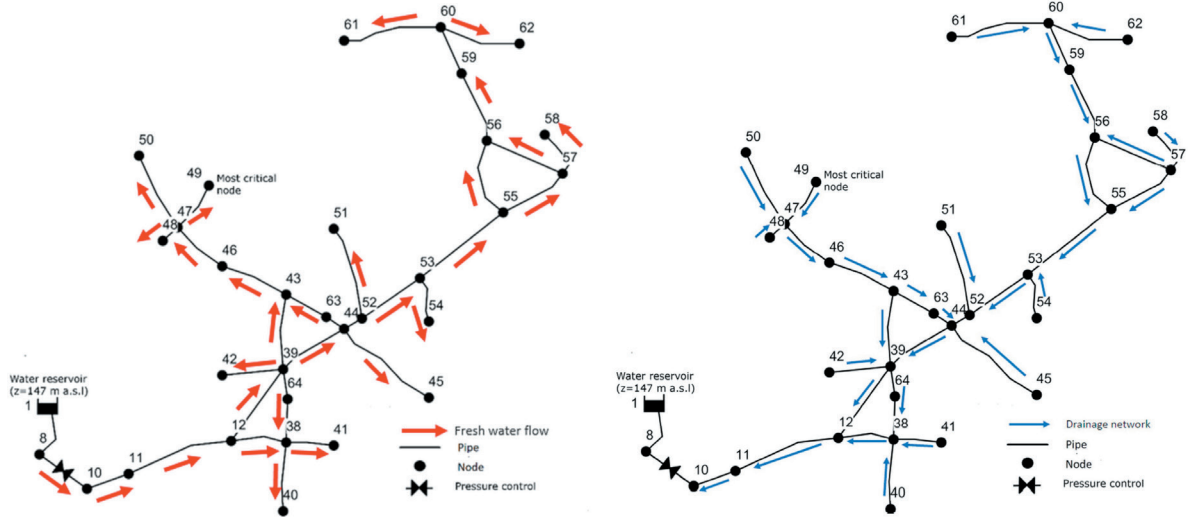


Figura 32. Redes de abastecimiento y saneamiento del Condado de Loais (IE)

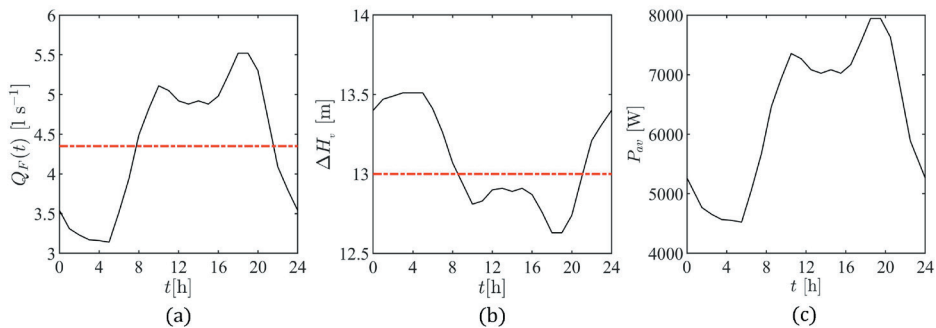


Figura 33. Series temporales de caudal (a), pérdidas de carga (b) y potencia disponible (c) a través de la válvula localizada en la tubería 8-10.

El aspecto crucial en el diseño de este tipo de MHP es el desfase entre el patrón de la demanda de caudal de agua potable y el patrón de la descarga de aguas residuales. Este desfase se debe a las características de la red de aguas residuales, que afectan a la velocidad de la corriente de agua. La distribución del caudal de aguas residuales puede determinarse a partir de la distribución del flujo de agua potable mediante un modelo de balance de entradas y salidas.

A continuación, el diseño de la planta MHP puede realizarse mediante un conjunto de tres ecuaciones, utilizando el caudal medio y las caídas de los hidrogramas de agua potable y residual. Cada geometría de MP&B se refleja en una posible caída de altura máxima de las aguas residuales. Los resultados de la fase de diseño se representan claramente en la Figura 34. La transferencia de energía de la red de agua potable a la de aguas residuales permite diferentes caídas de altura de presión en el bombeo de aguas residuales en función del coeficiente de escorrentía, ϕ . Para disponer de potencia en el nudo de producción de la tubería 8-10, la reducción de altura en la estación de bombeo debería ser de entre 1,6 m y 3,3 m.

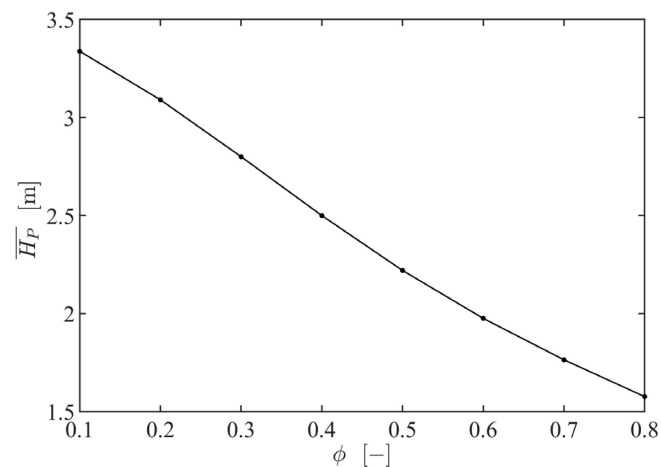


Figura 34. Valor medio diario de altura de presión versus coeficiente de escorrentía (ϕ).

Esquema de la instalación MHP y alojamiento de los equipos

La viabilidad de una MHP en una red de distribución de agua está estrictamente relacionada con el coste total de la planta, incluyendo el dispositivo de producción de energía (EDP), las tuberías, los elementos y válvulas de control, los componentes eléctricos, la caseta o alojamiento del equipo, la conexión a la red y el mantenimiento. Teniendo en cuenta la escasa potencia disponible y los reducidos ingresos anuales asociados, estos costes deben ser muy controlados. En muchos casos, es posible obtener un Valor Actual Neto (VAN) positivo si se dan las condiciones favorables de diseño. El uso de PATs es la solución más adecuada para contener los costes de DPE. El coste de los componentes eléctricos puede minimizarse utilizando una PAT de velocidad fija, con energía producida en la frecuencia de la red eléctrica con un generador asíncrono. Las tuberías y la válvula de control representan un alto porcentaje de los costes, sobre todo cuando existe una alta variabilidad de caudal y de presión en el sistema de distribución. En muchos casos, las instalaciones de MHP se pueden instalar en un pozo de registro grande o en la cámara de un depósito de suministro, lo que reduce el coste de la instalación. La conexión a la red también suele estar garantizada en la mayoría de los emplazamientos urbanos. Por último, el coste de mantenimiento de la planta, que en la actualidad sólo puede estimarse debido a la ausencia de experiencias previas, debería de ser reducido debido a que sólo se usan componentes de calidad y fiables. La viabilidad económica de una central hidroeléctrica equipada con DPEs de baja potencia/alta producción es muy sensible a que fallen en cualquiera de las condiciones anteriores. Un caso clásico es la ausencia de una conexión a la red en el punto de producción, o la falta de cualquier tipo de pozo de registro o infraestructura para el alojamiento de la instalación. En estos casos, la única solución es usar la energía en el mismo punto de producción y con un tamaño reducido de planta.

Otra situación compleja se da en los ramales periféricos de la red

con potencias disponibles de tan sólo 1 kW y con una gran fluctuación de caudal y de presión, lo que genera unos ingresos muy reducidos. Diversos trabajos de investigación ofrecen nuevas soluciones que pueden ser viables para estas condiciones extremas. Una posibilidad es el uso de las PATs sin un sistema de regulación completo. El sistema simple-serie-paralelo (SSP) para planta o instalaciones hidroeléctricas se ha propuesto recientemente para zonas residenciales, utilizando dos PATs y tres válvulas simples de apertura y cierre (ON/OFF), Figura 36. Mediante un uso alternativo de las válvulas, las dos PATs pueden trabajar en paralelo o en serie, cubriendo una amplia gama de condiciones locales de funcionamiento, Figura 37. La SSP representa una solución simple que permite sustituir una válvula reductora de presión, teniendo en cuenta que las condiciones de trabajo de las PATs no coinciden con las condiciones de operación requeridas. Por lo tanto, la presión a la salida no está totalmente garantizada, sino que se obtiene sólo de forma aproximada. Esta solución aumenta los ingresos de la instalación, por el amplio rango de caudales en el que es posible la producción de energía, y reduce el coste de la planta, por la ausencia de un sistema de regulación completo.

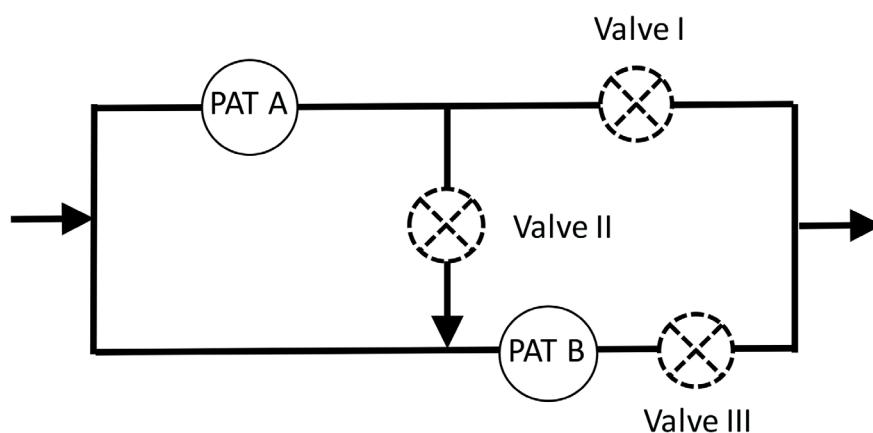


Figura 35. Sistema de PAT simple, serie, paralelo (SSP).

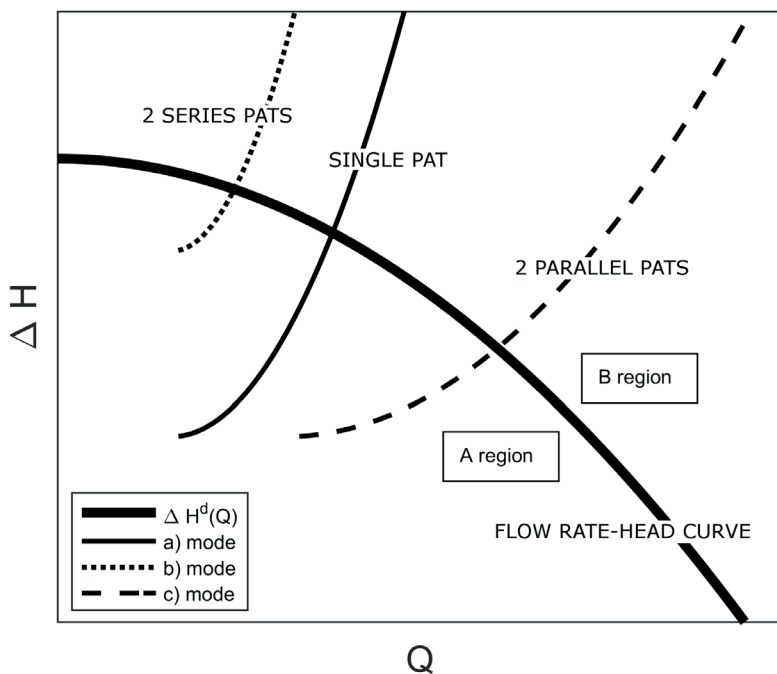


Figura 36. Condiciones de trabajo del sistema SSP

En el marco del proyecto REDAWN se ha propuesto, realizado y probado un nuevo perfeccionamiento del sistema SSP. El Energy Booster, representado en la figura 14, es un sistema SSP compacto que utiliza bombas sumergidas semiaxiales como PAT. La ventaja de este sistema es el completo aislamiento de la instalación o planta eléctrica y la facilidad de alojamiento de la instalación MHP.

Estrategia para la localización de la instalación MHP

En una red de distribución de agua compleja, la ubicación óptima de las instalaciones hidroeléctricas en el marco de una estrategia de reducción de la presión es una tarea compleja. Es importante subrayar desde el principio que este problema no puede resolverse

mediante algoritmos numéricos que consideren todo el espacio de soluciones. El número de estados de la red y el número de variables es demasiado grande en el sistema real incluso para las técnicas de optimización más avanzadas. Evidentemente, para un fin práctico, estas técnicas no se utilizarán en la red completa y habrá que recurrir a una estrategia de simplificación.

La primera posibilidad es utilizar un procedimiento en dos pasos: primero encontrar i) la ubicación óptima de los nudos de producción de energía y, a continuación, ii) evaluar la viabilidad económica de la sustitución de una válvula reductora de presión. Esta técnica es probablemente la más razonable, teniendo en cuenta que la principal ventaja económica de una estrategia de reducción de la presión proviene del menor coste del agua debido a la contención de las fugas. Además, la investigación sobre la ubicación óptima de los nudos de producción está realmente avanzada y ya se dispone de códigos numéricos para un uso en la práctica.

Una segunda posibilidad es encontrar una ubicación razonable para la planta o instalación hidroeléctrica mediante un enfoque heurístico. Esta alternativa es mucho más eficaz cuando se tiene una gestión de la red basada en sectores con patrones de presión conocidos y bien controlados y medidas de caudales, con el fin de reducir las pérdidas de agua y optimizar la gestión de dichos sistemas. Los sectores se definen en función de una serie de condiciones topográficas, hidráulicas y sociales. A continuación, se simplifican los bucles de la red de agua aislando los sectores, reduciendo al mínimo los flujos de entrada y salida. Como consecuencia, el problema de la localización óptima se reduce en N problemas diferentes, siendo N el número de sectores.

Una vez reducida la complejidad del problema de la ubicación óptima de las PATs, un modelo de optimización numérica puede considerarse como la mejor manera de identificar la ubicación óptima de las válvulas y de la instalación MHP. Durante el proyecto REDAWN se han desarrollado algunos modelos de optimización

complejos que consideran toda la red y el patrón de demanda diario. El modelo propuesto está diseñado para encontrar la ubicación óptima de la instalación MHP, teniendo en cuenta tanto el ahorro de agua como la producción de energía. La idea que subyace al modelo es que la red de distribución de agua es un sistema complejo, en el que cualquier modificación puede afectar al comportamiento de toda la red. Además, en determinadas ubicaciones el uso de una instalación MHP puede ser una solución viable tanto para reducir la presión como para producir energía, pero, en otros casos, la reducción de la presión podría producir un gran ahorro de agua, pero una pequeña recuperación de energía: ahí una válvula puede ser más conveniente que una turbina. El objetivo del modelo propuesto es la maximización de los ingresos por la instalación de PATs y válvulas. La figura 38 muestra las ubicaciones óptimas de bombas y turbinas obtenidas en una red sintética de agua: los ingresos anuales debidos a la producción de energía y al ahorro de agua en este caso de estudio, relacionados con el volumen de entrada de la red, pueden ser de 0.036 €/m³/año.

En muchos casos, será necesario un diseño en dos pasos. En el primer paso se encontrará una solución aproximada que maximice el Valor Actual Neto de la instalación de plantas hidroeléctricas, basándose en un esquema simplificado de una planta MHP. La solución del modelo es el caudal disponible y el salto de altura. A continuación, a partir de estos valores, se obtendrá el esquema o diseño definitivo de la MHP mediante un refinamiento de la solución preliminar, con la aplicación del procedimiento de diseño presentado anteriormente.

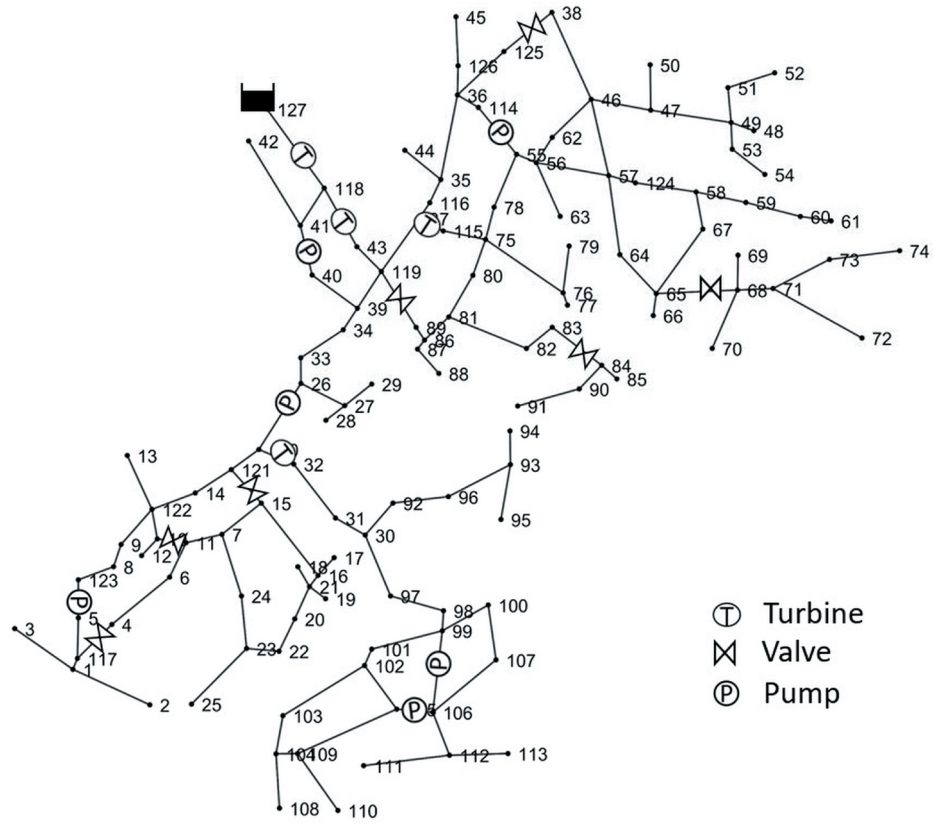


Figura 37. Ubicación óptima de turbinas, bombas y válvulas en una red sintética

8. Beneficios ambientales

Además del beneficio económico de la recuperación de energía, la implementación de la tecnología MHP conlleva un beneficio medioambiental. En algunos casos, el beneficio medioambiental per se, podría representar una importante motivación para la instalación de plantas MHP, teniendo en cuenta el creciente interés por el medio ambiente a nivel político y social.

Se han identificado los siguientes efectos positivos de la instalación de plantas MHP:

1. Se reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la reducción de la demanda energética en redes. Esto tiene un impacto directo en el calentamiento global y el cambio climático.
2. Se evitará la generación de residuos contaminantes durante el funcionamiento del sistema.
3. Una vez instalado el nuevo equipo, las propiedades del agua no se verán alteradas.
4. Requieren de un espacio más reducido que las plantas hidroeléctricas tradicionales, lo que supone una menor obra civil y una reducción del impacto ambiental.

La introducción de dispositivos MHP en infraestructuras hidráulicas en funcionamiento reporta importantes beneficios medioambientales. En primer lugar, es un sistema de generación de electricidad renovable. A diferencia de los combustibles fósiles, las energías renovables no emiten GEI a la atmósfera, que favorecen el cambio climático. En segundo lugar, según diversos estudios del IDAE, la generación hidroeléctrica es el sistema de producción de electricidad que produce menos impactos en el medio ambiente por kWh generado, incluyendo las fuentes renovables.

Beneficios ambientales

Sus principales beneficios ambientales son los siguientes:

5. Uso no consuntivo del agua, ya que el agua utilizada no se consume, siendo devuelta al medio natural sin alteración de sus características.
6. Carácter local, al reducir los impactos ambientales de cualquier tipo de transporte.
7. No produce residuos contaminantes, salvo en la fase de construcción, en la que siempre se deben seguir medidas preventivas y correctoras.
8. Utiliza equipos cuya fabricación implica el uso de un menor volumen de sustancias peligrosas y generación de residuos en comparación con otras tecnologías.
9. Recurso ilimitado, gracias al ciclo hidrológico natural;
10. En tercer lugar, el carácter de las microcentrales o plantas MHP les proporciona una serie de ventajas frente a las centrales hidroeléctricas tradicionales. Las centrales hidroeléctricas tradicionales ocupan grandes espacios, causando un impacto social y medioambiental relativamente importante. Un punto clave es el menor volumen de obra civil necesario para la puesta en marcha.

En general, la fase de puesta en marcha o construcción de una central hidroeléctrica tradicional incluye las siguientes acciones:

1. Acondicionamiento de caminos
2. Acolchado y movimiento de tierras (dependiendo del tamaño de la obra).
3. Colocación de tuberías y construcción de arquetas
4. Instalación de la línea eléctrica;
5. Relleno de huecos de excavación;

6. Construcción de edificios para albergar equipos electromecánicos;
7. Transporte, almacenamiento y montaje de los equipos electromecánicos. Estos trabajos generan una serie de impactos ambientales.

Los principales efectos potenciales son los siguientes:

1. Liberación de sustancias, energía o ruido (liberación accidental de productos químicos en la maquinaria de construcción o en los trabajos de mantenimiento; emisión de ruido y vibraciones por el uso de maquinaria en la construcción).
2. Contaminación del suelo, del aire y del agua (pérdida de calidad del aire por la emisión de gases de combustión y polvo de la maquinaria de construcción, contaminación del agua y del suelo por vertidos accidentales).
3. Destrucción de la vegetación, los paisajes, los hábitats y la fauna: aumento de la capacidad erosiva del agua y alteración de los ecosistemas acuáticos por las variaciones del caudal, los materiales de deposición, las aguas tranquilas, los efectos de barrera de agua de las presas, la erosión y la degradación del suelo y la pérdida de la cubierta vegetal por los movimientos de tierra y las excavaciones, la pérdida del hábitat de las especies por la desaparición de la vegetación y la inundación de los márgenes tras la construcción de las presas, el desplazamiento de las especies causado por el ruido; el impacto visual debido a los cambios en el paisaje por la presencia de nuevas infraestructuras.

La integración de una planta MHP en cualquier infraestructura hidráulica sólo requiere los pasos 3 a 7 anteriores y en una proporción mucho menor, lo que repercute en una menor incidencia de los efec-

tos ambientales durante la fase de instalación. Los impactos se minimizan como consecuencia de un menor volumen de excavación y de movimiento de tierras, y un menor uso de maquinaria pesada. Al no ubicarse en un cauce natural no provoca alteración del medio natural. Se evitan los problemas de alteración de la corriente de agua o el efecto barrera por la construcción de presas o azudes. También se evita, del mismo modo, la pérdida de hábitats por la inundación de grandes áreas.

No obstante, hay que tener en cuenta que durante el funcionamiento de una instalación MHP se pueden producir los impactos ambientales típicos de cualquier central hidroeléctrica, aunque a menor escala por tratarse de una instalación más pequeña. Los principales impactos ambientales que pueden producirse en esta fase de funcionamiento son:

1. Liberación de energía o ruido (emisión de ruido y vibraciones por la turbina en funcionamiento; emisión de radiación electromagnética en las líneas eléctricas).
2. Contaminación del suelo y del agua (contaminación del agua y del suelo por la liberación accidental de productos químicos en el mantenimiento). En el caso particular de las centrales MHP integradas en redes de abastecimiento de agua se añade el riesgo de pérdida de agua potable por posible dilución de sustancias tóxicas. Para eliminar este riesgo hay que asegurar que los elementos en contacto con el agua tengan los tratamientos indicados por la legislación y que los circuitos de lubricación de las partes móviles en contacto con el agua no produzcan fugas.

En cuanto a la mejora medioambiental de la infraestructura hidráulica, la introducción de estos dispositivos ofrece la posibilidad de reducir el consumo eléctrico de fuentes externas mediante el autoconsumo. Este hecho no sólo reduce los costes de explotación, sino que

también contribuye a reducir la huella de carbono de la instalación. Otro efecto medioambiental positivo es la reducción del riesgo de saturación del terreno por rotura de tuberías ya que los dispositivos MHP actúan como elementos reductores de presión. También tiene una ventaja económica para los promotores debido a la reducción de los costes de inversión en válvulas rotas y equipos similares. Para una evaluación general del beneficio medioambiental de la tecnología MHP en el AA, se ha calculado la reducción de la huella de carbono en función del potencial de MHP en cada país. Teniendo en cuenta que las plantas MHP producen electricidad sin emitir gases de efecto invernadero, para la reducción de las emisiones de CO₂ se ha considerado el equivalente a la energía eléctrica generada según el mix eléctrico de cada país.

Los resultados del beneficio potencial medioambiental se recogen en la Figura 38.

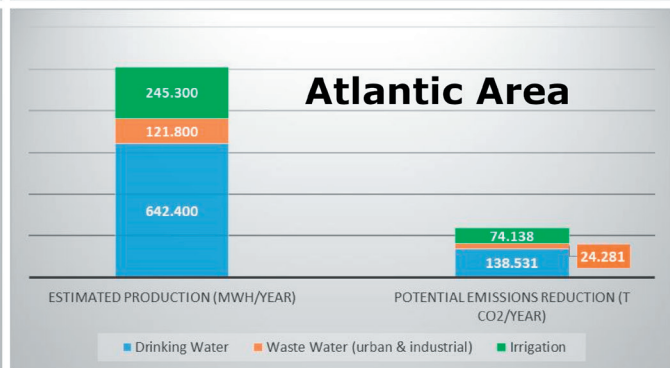
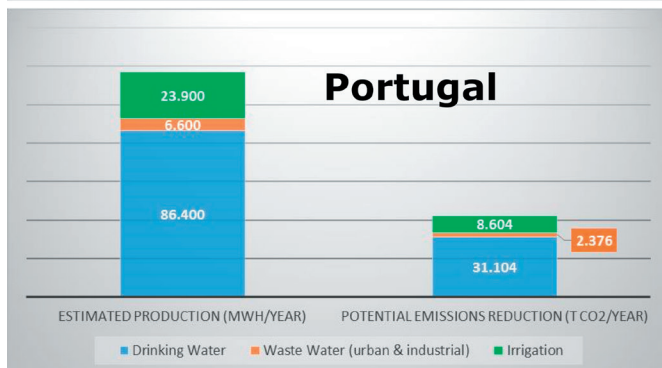
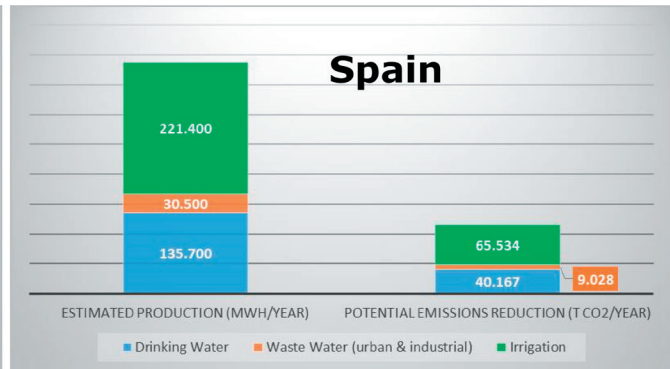
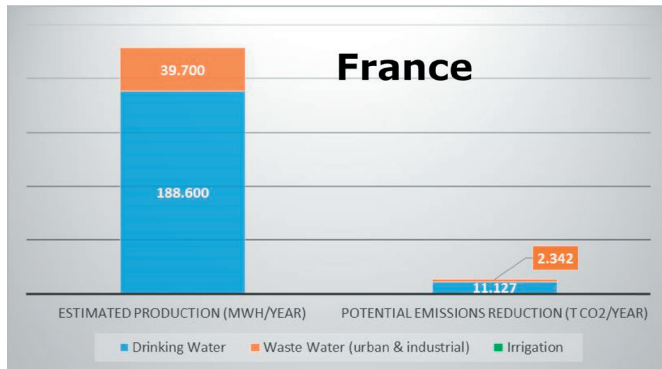
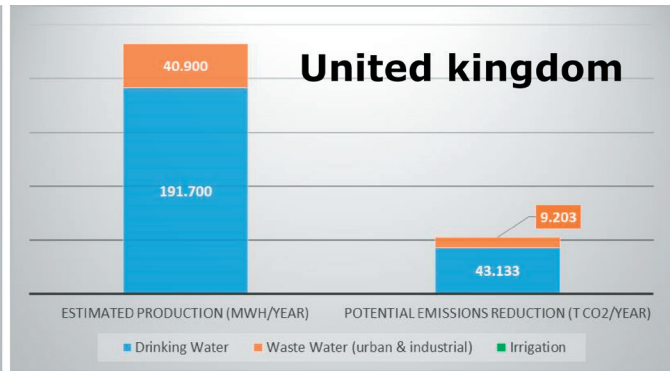
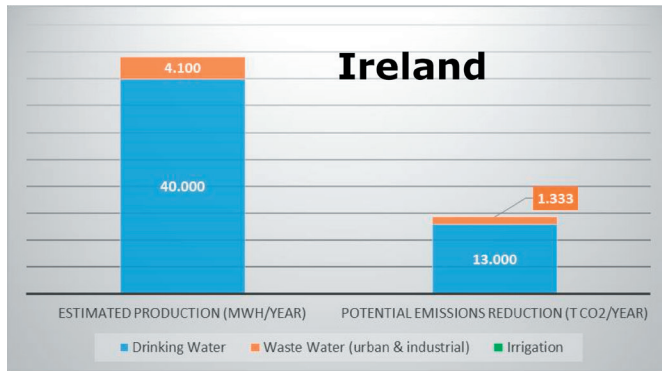


Figura 38. Beneficio ambiental potencial en los países del área atlántica

9. Conclusiones

El proyecto REDAWN se ha centrado en la explotación de la recuperación de energía micro-hidroeléctrica en el sector del agua, incluyendo las redes de abastecimiento de agua potable, las depuradoras, la industria y las redes de riego, en el Área Atlántica (AA) de Europa. Además, se ha mejorado el conocimiento en muchos aspectos fundamentales de la tecnología PAT y se han desarrollado herramientas de guía y apoyo para el diseño de instalaciones micro hidroeléctricas.

Este manual describe las oportunidades para la recuperación de energía en las redes de distribución de agua de la zona AA, establece el impacto potencial en términos económico y medioambientales de la implementación de la tecnología y especifica las directrices para el diseño de una instalación MHP en las redes de abastecimiento de agua. Estas directrices permitirán a los responsables políticos, a los gestores del agua y a los técnicos comprender en profundidad la importancia de la recuperación de energía dentro de los sistemas de transporte y la distribución del agua. La gestión adecuada de la presión en la red es esencial para asegurar un buen uso del agua y de la energía, dichas reducciones habitualmente se consiguen mediante válvulas reductoras de presión.

Una planta o instalación micro-hidroeléctrica permite una regulación de la presión en la red equivalente a la de una válvula reductora de presión, recuperando la energía disponible pero habitualmente disipada en estas válvulas. Además, estas instalaciones son perfectamente viables en términos de fiabilidad y costes. Un diseño correcto requiere de un análisis profundo de las condiciones de la red, en términos de uso de energía, estado hidráulico y control de la red. El uso sostenible de la energía recuperada es, en muchos casos, la condición más relevante en la elección de la configuración de la instalación o planta hidroeléctrica.

Conclusiones

10. References

- [1] Besharat, M., Dadfar, A., Viseu, M. T., Brunone, B., & Ramos, H. M. (2020). Transient-flow induced compressed air energy storage (TI-CAES) system towards new energy concept. *Water*, 12(2), 601.
- [2] Capelo, B., Pérez-Sánchez, M., Fernandes, J. F., Ramos, H. M., López-Jiménez, P. A., & Branco, P. C. (2017). Electrical behaviour of the pump working as turbine in off grid operation. *Applied Energy*, 208, 302-311.
- [3] Carravetta, A., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2018). A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas. *Renewable Energy*, 125, 1003-1014.
- [4] Carravetta, A., Fecarotta, O., Ramos, H. M., Mello, M., Rodriguez-Diaz, J. A., Morillo, J. G., ... & McNabola, A. (2018). Reducing the Energy Dependency of Water Networks in Irrigation, Public Drinking Water, and Process Industry: REDAWN Project. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 2, No. 11, p. 681)*.
- [5] Carravetta, A; Houreh, S.D; Ramos, H.M. *Pumps as Turbines: Fundamentals and Applications*, Springer, 2018.
- [6] Chacon, M. C., Díaz, J. A. R., Morillo, J. G., & McNabola, A. (2020). Hydropower energy recovery in irrigation networks: Validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. *Renewable Energy*, 147, 1728-1738.
- [7] Chacón, M. C., Díaz, J. A. R., Morillo, J. G., & McNabola, A. (2020). Estimating regional potential for micro-hydropower energy recovery in irrigation networks on a large geographical scale. *Renewable Energy*, 155, 396-406.

- [8] Chacón, M. C., Díaz, J. A. R., Morillo, J. G., & McNabola, A. (2021). Evaluation of the design and performance of a micro hydropower plant in a pressurised irrigation network: Real world application at farm-level in Southern Spain. *Renewable Energy*, 169, 1106-1120.
- [9] Chacón, M. C., McNabola, A., Hydropower energy recovery potential from irrigation networks, Presented at ENVIRON2018, Cork, Ireland.
- [10] Chacón, M. C., Rodríguez-Díaz, J. A., Morillo, J. G., Gallagher, J., Coughlan, P., & McNabola, A. (2018). Potential Energy Recovery Using Micro-Hydropower Technology in Irrigation Networks: Real-World Case Studies in the South of Spain. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 2, No. 11, p. 679)*.
- [11] Cimorelli, L., & Fecarotta, O. (2020). Optimal Regulation of Variable Speed Pumps in Sewer Systems. In *Environmental Sciences Proceedings (Vol. 2, No. 1, p. 58)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [12] Crespo Chacón, M., Rodríguez Díaz, J. A., García Morillo, J., & McNabola, A. (2019). Pump-as-turbine selection methodology for energy recovery in irrigation networks: Minimising the payback period. *Water*, 11(1), 149.
- [13] Fecarotta, O., & Cimorelli, L. (2021). Optimal scheduling and control of a sewer pump under stochastic inflow pattern. *Urban Water Journal*, 1-11.
- [14] Fecarotta, O., Martino, R., & Morani, M. C. (2019). Wastewater pump control under mechanical wear. *Water*, 11(6), 1210.
- [15] Fecarotta, O., Messa, G. V., Pugliese, F., Carravetta, A., Malavasi, S., & Giugni, M. (2018). Preliminary development of a method for impact erosion prediction in pumps running as turbines. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 2, No. 11, p. 680)*.

- [16] Fernandes, J. F., Pérez-Sánchez, M., da Silva, F. F., López-Jiménez, P. A., Ramos, H. M., & Branco, P. C. (2019). Optimal energy efficiency of isolated PAT systems by SEIG excitation tuning. *Energy Conversion and Management*, 183, 391-405.
- [17] Fontanella, S., Fecarotta, O., Molino, B., Cozzolino, L., & Della Morte, R. (2020). A Performance Prediction Model for Pumps as Turbines (PATs). *Water*, 12(4), 1175.
- [18] Giudicianni, C., Herrera, M., di Nardo, A., Carravetta, A., Ramos, H. M., & Adeyeye, K. (2020). Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119745.
- [19] Manna, M., Vacca, A., & Verzicco, R. (2020). Pulsating spiral Poiseuille flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 890.
- [20] Mérida García, A., Rodríguez Díaz, J. A., García Morillo, J., & McNabola, A. (2021). Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain. *Water*, 13(5), 691.
- [21] Mitrovic, D., Antonio, J., Diaz, R., Morillo, J. G., Coughlan, P., Gallagher, J., & McNabola, A. (2018). Hydropower energy recovery in water pipe networks: spatial regression analysis using GIS, assessing the correlation between energy recovery potential and geographical data. *Proceedings of the Water Efficiency Conference 2018, 5-7 September 2018, Aveiro Portugal: WATEF Network/University of Bath*.
- [22] Mitrovic, D., Chacón, M. C., García, A. M., Morillo, J. G., Diaz, J. A. R., Ramos, H. M., ... & McNabola, A. (2021). Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU. *Water*, 13(7), 899.
- [23] Mitrovic, D., McNabola, A., Hydropower energy recovery potential of water distribution networks: Assessing the correlation between

the potential and geographical data, Presented at ENVIRON2018, Cork, Ireland.

- [24] Mitrovic, D., Morillo, J. G., Rodríguez Díaz, J. A., & Mc Nabola, A. (2021). Optimization-Based Methodology for Selection of Pump-as-Turbine in Water Distribution Networks: Effects of Different Objectives and Machine Operation Limits on Best Efficiency Point. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(5), 04021019.
- [25] Morani, M. C., Carravetta, A., D'Ambrosio, C., & Fecarotta, O. (2021). A new mixed integer non-linear programming model for optimal PAT and PRV location in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 1-15.
- [26] Morani, M. C., Carravetta, A., D'Ambrosio, C., & Fecarotta, O. (2020). A New Preliminary Model to Optimize PATs Location in a Water Distribution Network. In *Environmental Sciences Proceedings* (Vol. 2, No. 1, p. 57). MDPI.
- [27] Morani, M. C., Carravetta, A., Del Giudice, G., McNabola, A., & Fecarotta, O. (2018). A comparison of energy recovery by PATs against direct variable speed pumping in water distribution networks. *Fluids*, 3(2), 41.
- [28] Morani, M. C., Carravetta, A., Fecarotta, O., & McNabola, A. (2020). Energy transfer from the freshwater to the wastewater network using a pat-equipped Turbopump. *Water*, 12(1), 38.
- [29] Morillo, J. G., Díaz, J. A. R., Crespo, M., & McNabola, A. (2018). Energy Saving Measures in Pressurized Irrigation Networks: A New Challenge for Power Generation. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, No. 23, p. 1440).
- [30] Morillo, J. G., McNabola, A., Camacho, E., Montesinos, P., & Díaz, J. R. (2018). Hydro-power energy recovery in pressurized irrigation networks: A case study of an Irrigation District in the South of Spain. *Agricultural Water Management*, 204, 17-27.

- [31] Novara, D., Carravetta, A., McNabola, A., & Ramos, H. M. (2019). Cost model for pumps as turbines in run-of-river and in-pipe microhydropower applications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(5), 04019012.
- [32] Perez-Sanchez, M., Sánchez-Romero, F. J., Ramos, H. M., & López-Jiménez, P. A. (2020). Improved planning of energy recovery in water systems using a new analytic approach to PAT performance curves. *Water*, 12(2), 468.
- [33] Pérez-Sánchez, M., Simão, M., López-Jiménez, P. A., & Ramos, H. M. (2017). CFD analyses and experiments in a PAT modeling: Pressure variation and system efficiency. *Fluids*, 2(4), 51.
- [34] Pienika, R., Usera, G., & Ramos, H. M. (2020). Simulation of a Hydrostatic Pressure Machine with Caffe3d Solver: Numerical Model Characterization and Evaluation. *Water*, 12(9), 2419.
- [35] Ramos, H. M., McNabola, A., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2020). Smart water management towards future water sustainable networks. *Water*, 12(1), 58.
- [36] Ramos, H. M., Pérez-Sánchez, M., Franco, A. B., & López-Jiménez, P. A. (2017). Urban floods adaptation and sustainable drainage measures. *Fluids*, 2(4), 61.
- [37] Ramos, H. M., Simão, M., McNabola, A., Novara, D., & Carravetta, A. (2018). Fostering Renewable Energies and Energy Efficiency in the Water Sector Using PATs and Wheels. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 2, No. 23, p. 1438)*.
- [38] Ramos, H. M., Zilhao, M., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2019). Sustainable water-energy nexus in the optimization of the BBC golf-course using renewable energies. *Urban Water Journal*, 16(3), 215-224.
- [39] Simão, M., Besharat, M., Ramos, H.M; (2018) Energy recovery using PAT, Silva-Afonso A and Rodrigues-Pimental, C. (Eds), Pro-

ceedings of the Water Efficiency Conference 2018, 5-7 September 2018, Aveiro Portugal: WATEF Network/ University of Bath.

- [40] Simão, M., Besharat, M., Carravetta, A., & Ramos, H. M. (2018). Flow velocity distribution towards flowmeter accuracy: CFD, UDV, and field tests. *Water*, 10(12), 1807.
- [41] Simão, M., Pérez-Sánchez, M., Carravetta, A., & Ramos, H. M. (2019). Flow conditions for PATs operating in parallel: Experimental and numerical analyses. *Energies*, 12(5), 901.
- [42] Simão, M., Pérez-Sánchez, M., Carravetta, A., López-Jiménez, P., & Ramos, H. M. (2018). Velocities in a centrifugal PAT operation: Experiments and CFD analyses. *Fluids*, 3(1), 3.
- [43] Stocks, C (2019) Micro hydropower and the Water Energy Food nexus, NS Energy 2020
- [44] Ueda, T., Roberts, E. S., Norton, A., Styles, D., Williams, A. P., Ramos, H. M., & Gallagher, J. (2019). A life cycle assessment of the construction phase of eleven micro-hydropower installations in the UK. *Journal of Cleaner Production*, 218, 1-9.

Lista de abreviaturas

AA	Zona Atlántica (Atlantic Area)
AER	Informe anual sobre Medio Ambiente (Annual Environmental Report)
BPTs	Depósitos de rotura de carga (Break Pressure Tanks)
CVs	Válvulas de control (Control Valves)
DA	Redes de distribución de agua (Water distribution networks)
DEM	Modelo digital de elevaciones del terreno (Digital Elevation Model)
DMA	Sectores de redes (District Management Areas)
DPE	Dispositivos de producción de energía (Energy production devices)
DTE-HP	Planta producción energía hidráulica de efluente tratados aguas abajo de la planta de tratamiento (Downstream treated Effluent Hydropower Plant)
EPA	Agencia de protección Ambiental (Environmental Protection Agency)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agricultural Organization of the United Nations)
GWh	Gigawatios-hora (Gigawatt-hour)
kW	Kilowatios (Kilowatt)
kWh	Kilowatios-hora (Kilowatt-hour)
LUR	Regresión uso del suelo (Land Use Regression)
MHP	Planta de producción de energía micro-hidroeléctrica (Micro hydropower Plant)
PAT	Bomba como turbina (Pump-as-turbine)
PE	Habitantes equivalentes (Person Equivalent)
PRVs	Válvulas reductoras de presión (Pressure Reducing Valves)
RB	Cuenca hidrográfica (River basin)
RDA	Redes de distribución de agua (Water distribution networks)
SD	Desviación estándar (Standard deviation)
SRs	Sistemas de almacenamiento de agua (Storage/Service Reservoirs)
TA	Redes de transporte de agua (Transmission network)
TIN	Red triangular irregular (Triangular Irregular Network)
USGS	Encuesta Servicio geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey)
USW-HP	Central hidroeléctrica de aguas residuales aguas arriba de la planta de tratamiento (Upstream Sewage Water Hydropower Plant)
WWDL	Autorización de vertidos (Wastewater Discharge Licence)
WSN	Red de distribución de agua (RDA) (Water supply network)
WP	Paquete de trabajo (Work Package)
WTWs	Trabajos de tratamiento de agua (Water Treatment Works)
WW	Agua residual (Wastewater)
WWN	Red de aguas residuales (Wastewater network)

REDAWN

Reducing Energy Dependency in Atlantic area Water Networks

Partners:

- Action Renewables
- Asociación Feragua de Comunidades de Regantes de Andalucía
- EDA Renováveis
- Empresa de Electricidade da Madeira
- Fundacion Asturiana de la Energia
- Hidropower Ltd
- Instituto Superior Técnico Lisboa
- Northern Ireland Water
- Nueces De Calonge
- Parceria Portuguesa para a Água
- Renova
- Syndicat Mixte de Production d'eau potable du Granvillais et de l'Avranchin
- Trinity College Dublin
- Universidad de Córdoba
- Università degli Studi di Napoli Federico II
- Water Efficiency Network (University of Bath)

