



# METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO EN AISLADA BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES PARA LA AGRICULTURA DE REGADÍO

**Aida Mérida García<sup>1</sup>, John Gallagher<sup>2</sup>, Juan Antonio Rodríguez Díaz<sup>3</sup>,  
Aonghus McNabola<sup>4</sup>.**

<sup>1,3</sup>Departamento de Agronomía, Área Hidráulica y Riegos, Universidad de Córdoba,  
Campus Universitario de Rabanales, Córdoba (España)

<sup>2,4</sup>Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College  
Dublin, College Green, Dublin 2, (Irlanda)

<sup>1</sup>g82megaa@uco.es

## RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos para el suministro energético en explotaciones agrícolas de regadío, basado en la reducción del coste económico y ambiental. El modelo emplea una versión modificada del algoritmo genético NSGA-II para dimensionar un sistema basado en la energía solar fotovoltaica y microhidráulica. Este modelo se aplicó a un caso de estudio en Andalucía, mostrando que las soluciones con menor impacto para las categorías de cambio climático y recursos energéticos tuvieron una alta dependencia de las baterías, y un consumo de combustible muy bajo, basando su funcionamiento en las fuentes de energía renovable. Sin embargo, el menor valor para el impacto vinculado al consumo de recursos minerales y metales tuvo un incremento considerable en el consumo de combustible, aumentando el coste total hasta un 25%. Las soluciones óptimas presentaron un porcentaje de aprovechamiento de la energía de hasta el 37%, estrechamente vinculado al patrón de distribución de la demanda y producción de energía solar y microhidráulica.

### Palabras clave

Análisis del ciclo de vida, coste de inversión y funcionamiento, energía fotovoltaica, energía microhidráulica, ratio de aprovechamiento de energía.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector de la agricultura representa un 10% de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a nivel mundial [1]. Las energías renovables ofrecen una alternativa de baja emisión de GEI para el abastecimiento energético en el sector de la agricultura de regadío. Además, a pesar de suponer un coste de inversión mayor que el correspondiente a las fuentes tradicionales de suministro energético, como las basadas en combustibles fósiles, los costes de operación son mucho menores [2]. No obstante, las tecnologías implicadas en la producción de energía renovable también tienen asociado un impacto ambiental, principalmente vinculado a su fabricación [3]. La variabilidad en la producción de algunas fuentes de energía renovable [4], como la solar fotovoltaica (FV), así como la marcada

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

estacionalidad en la demanda de energía en el sector del regadío, dan como resultado bajos porcentajes de aprovechamiento de la energía generada, en sistemas aislados de la red eléctrica. En zonas de clima mediterráneo, la demanda de energía proveniente de la red de riego y actividades complementarias se concentra, principalmente, en los meses que van de abril a octubre, coincidiendo con la temporada de mayor demanda de agua por parte del cultivo. Esta estacionalidad tan marcada, ha dado lugar en estudios anteriores, a porcentajes de aprovechamiento del total de la energía generada por tecnologías como la microhidráulica, o la solar FV, del 2% [5] y 16% [2], respectivamente. Este bajo porcentaje de aprovechamiento repercute directamente en el impacto ambiental atribuido a cada kWh de energía útil empleado en la actividad del riego, reduciendo la eficacia del sistema de abastecimiento de energía en términos ambientales. Sin embargo, en estos mismos estudios se ha observado que otras actividades demandantes de energía que tienen lugar en las explotaciones agrícolas de regadío, podrían ser parcial o totalmente abastecidas por estas fuentes de energía renovable. Por este motivo, es necesario desarrollar modelos de dimensionamiento del sistema de abastecimiento energético para una gestión integral de la demanda de energía a escala de finca, que incluyan criterios de optimización relacionados con el impacto ambiental, además del impacto económico, especialmente en aquellos entornos sin acceso a la red eléctrica.

En investigaciones previas se han desarrollado modelos para el dimensionamiento de sistemas híbridos de suministro energético centrados en la reducción del coste total, asegurando satisfacer la demanda de energía [6,7]. En otros trabajos se incluyen los aspectos ambientales vinculados a la producción de energía, abordados dentro del estudio del ciclo de vida (LCA, Life Cycle Assessment) de las tecnologías implicadas [8,9]. Sin embargo, son muy escasos los trabajos en los que se consideran criterios ambientales para la optimización del diseño del sistema de abastecimiento de energía, particularmente aplicados a sectores con demandas tan estacionales, como ocurre en el sector agrícola.

En este trabajo se presenta un modelo para la optimización del sistema de abastecimiento de energía híbrido fundamentado en las energías renovables solar FV y micro-hidráulica. Este modelo emplea una versión modificada del algoritmo genético NSGA-II, cuyas funciones objetivo se han enfocado a criterios ambientales y económicos. El modelo presenta una serie de posibles soluciones que incluyen el dimensionamiento de cada una de las fuentes de energía principales, así como elementos de apoyo (baterías y generador diésel, de ser necesario). Además, el modelo también selecciona el tipo de herramientas y vehículos (eléctricos o de combustión) requeridos para el mantenimiento del cultivo, que optimizan la gestión integral energética de la finca. Una vez desarrollado el modelo, éste se aplicó a un caso de estudio en la provincia de Córdoba.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 CASO DE ESTUDIO**

El caso de estudio es una finca de nogal de regadío de 170 hectáreas, perteneciente a la Comunidad de Regantes de la Margen Izquierda del Canal del Genil. En este caso particular, las demandas de energía provenientes de la red de abastecimiento de agua para riego se corresponden únicamente con las exigidas por las electroválvulas para el control del riego, así como el equipo de fertirriego. Estos equipos están coordinados con el funcionamiento de la red de riego, siendo el tiempo de funcionamiento el mismo, y alcanzando una demanda de

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

potencia máxima de 3.6 kW. El agua de riego es, en este caso, previamente bombeada desde la comunidad de regantes. Este caso de estudio fue analizado en trabajos anteriores [10,11] ([www.redawn.es](http://www.redawn.es)), en los que se identificó un punto en la red de distribución de agua con exceso de presión, que podría ser aliviado mediante la instalación de una micro-turbina o PAT (bomba como turbina), con un potencial máximo de recuperación de energía de hasta 15 kW de potencia. En el marco del proyecto REDAWN se instaló una planta piloto híbrida con una PAT de 4 kW y dos paneles fotovoltaicos (330 W), acompañados de un banco de baterías de 10.56 kW, para la sustitución de un generador diésel de 4.8 kW. Sin embargo, se observó que el porcentaje de aprovechamiento de la energía generada por la planta piloto fue del 2% anual [5], existiendo además otras demandas de energía en la explotación que podrían ser parcialmente cubiertas con esta energía, lo que exigiría un redimensionamiento del sistema. Estas demandas de energía deben ser siempre definidas previamente por el usuario, detallando el número de dispositivos de cada tipo (herramientas para poda, recolección, vehículos, etc), así como su consumo de combustible y demanda de potencia (combustión/eléctricos), tiempo de funcionamiento, tiempo de recarga, etc.

El tiempo de riego define el tiempo de funcionamiento de la red de distribución de agua (cuando ésta suponga una demanda de energía), y de otros sistemas complementarios (como las electroválvulas y sistema de fertirriego). Además, este tiempo de riego también define, en este caso, el tiempo de funcionamiento del sistema de recuperación de energía (PAT). Éste se calcula de forma previa en el modelo, en base a los datos de entrada relativos a precipitación, evapotranspiración, información del cultivo y de suelo, entre otros, que deben ser facilitados por el usuario.

## 2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo del trabajo fue desarrollar un modelo para llevar a cabo el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de generación de energía (con la energía solar FV y microhidráulica como fuentes principales), para la gestión energética en aislada a escala de finca, minimizando el impacto ambiental y coste total asociados. Para ello se establecieron dos funciones objetivo (FO), considerando una vida de proyecto de 30 años.

### 2.2.1. FO 1: minimizar el coste económico total

La FO 1 evaluó el coste del ciclo de vida de cada combinación de fuentes de energía (n) propuesta, contabilizando el coste de inversión (IC) (coste asociado a la instalación de la PAT, planta FV, baterías y generador diésel), así como el coste de funcionamiento (OC) (consumo de combustible del generador diesel y herramientas y vehículos de combustión, reemplazo de las baterías, etc.) para el total de años (y) de la vida del proyecto.

$$OF1 = \sum_{n=1}^{n=EST} [IC_n + \sum_{y=1}^{y=Y} OC_{n,y}] \quad (1)$$

### 2.2.2 FO 2: minimizar el impacto ambiental

La FO 2 evaluó la carga ambiental atribuida a cada solución considerando las categorías de impacto (CI) de cambio climático (kg CO<sub>2</sub> eq. kWh<sup>-1</sup>), recursos energéticos (MJ kWh<sup>-1</sup>), y recursos metálicos y minerales (kg Sb eq. kWh<sup>-1</sup>), y las etapas de instalación (i) y operación (o). Se generó una base de datos que contiene el impacto ambiental unitario correspondiente a los principales materiales y procesos incluidos en la fabricación de cada una de las tecnologías (ej. módulo fotovoltaico) e inputs (ej. combustible diésel y gasolina) evaluados.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Este cálculo se hizo de acuerdo al análisis de ciclo de vida (LCA, Life Cycle Assessment) [12], considerando 1 kWh de energía útil como unidad de referencia.

$$OF2 = \sum_{n=1}^{n=EST} [(CI_{n,i}) + \sum_{y=1}^{y=Y} (CI_{n,o,y})] \quad (2)$$

**2.3 ALGORITMO MULTIOBJETIVO****2.3.1 Población inicial**

El modelo desarrollado se basa en el algoritmo genético NSGA-II [13], el cual genera de forma aleatoria una población inicial (conjunto de posibles soluciones, llamadas cromosomas). Este conjunto de cromosomas es evaluado de acuerdo con las funciones objetivo, para finalmente seleccionar aquellos con mejores resultados. Posteriormente, se generan nuevos cromosomas mediante los operadores de cruzamiento y mutación, a partir de los seleccionados previamente. Las etapas de evaluación, clasificación y generación de nuevos cromosomas se repiten hasta completar el total de generaciones establecido para la simulación del modelo. Cada cromosoma está compuesto por una serie de variables, que en este caso responden al número de dispositivos (que pueden ser de combustión o eléctricos: herramientas y vehículos). Además, se incluye una variable para el dimensionamiento de la PAT (porcentaje de la máxima PAT que podría instalarse), otra para el dimensionamiento de la planta FV (indica el porcentaje de la máxima potencia demandada que debe emplearse para dimensionar la planta FV), y otra para el dimensionamiento del banco de baterías (indica el porcentaje del excedente de energía producida por la PAT y la planta FV que debe emplearse para dimensionar el banco de baterías).

**2.3.2 Evaluación de las funciones objetivo**

La evaluación de las funciones objetivo comienza con el cálculo de la demanda de potencia horaria para cada día del año, en función de los dispositivos y la tipología definida en cada cromosoma, horarios de operación y calendario de riego. La máxima potencia demandada, junto a los valores establecidos en cada cromosoma, definen el dimensionamiento de la PAT, y con ello se obtiene el coste, así como los materiales y procesos requeridos para su fabricación. En base al tiempo de funcionamiento de la red de riego, y considerando un rendimiento o eficiencia constante para la PAT del 50% [14], se determina el potencial de producción de energía de ésta. Posteriormente, se dimensiona la planta FV, según la información contenida en cada cromosoma (porcentaje de 0 a 200%) y la máxima demanda de potencia que no puede ser cubierta por la PAT. Una vez dimensionada, se determina la cantidad de materiales y procesos asociados a la planta FV, así como el coste de ésta. En base a la potencia pico determinada, así como la información relativa a la irradiancia y temperatura, principalmente, el modelo simula la producción de energía FV horaria para todo un año de referencia. Conocida la capacidad de producción de energía de la PAT y la planta FV, y considerando la variable incluida en cada cromosoma para el dimensionamiento de las baterías, se calcula la capacidad de éstas, que permite aproximar los requerimientos de materiales y procesos, así como su coste. Finalmente, si es necesario, se determina el dimensionamiento de un generador diesel para cubrir la demanda de potencia restante, así como el consumo de combustible en función de las horas de funcionamiento.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**3. RESULTADOS**

El modelo desarrollado fue simulado para el caso de estudio presentado, considerando un total de 300 cromosomas y 20 generaciones, con una probabilidad de ocurrencia de los operadores genéticos de cruzamiento y mutación del 90 y 10%, respectivamente. El patrón de demanda de potencia mostró una importante variabilidad a lo largo de las horas del día, y entre distintos días del año, vinculada a las operaciones estacionales que tienen lugar en la explotación (riego, poda, recolección, etc.). Dado el patrón de producción de energía, el exceso generado durante el día (FV) y durante las horas de riego (microhidráulica), es parcialmente almacenado en un banco de baterías para la recarga de los dispositivos eléctricos durante la noche, cuando así lo requiere la solución propuesta. Para la gestión de la explotación del caso de estudio se consideraron un total de 14 herramientas (sacudidores de ramas y motosierras) y 9 vehículos (buggies, quads y un tractor). Se examinaron 3 simulaciones, considerando en cada una de ellas una categoría de impacto distinta para la FO 2. La simulación del modelo mostró el conjunto de posibles soluciones óptimas que minimizan el coste de inversión y el impacto ambiental del sistema de suministro energético, de las cuales se seleccionaron aquellas con valores más equilibrados para ambas funciones objetivo (la más próxima al origen de coordenadas en la representación del frente de Pareto).

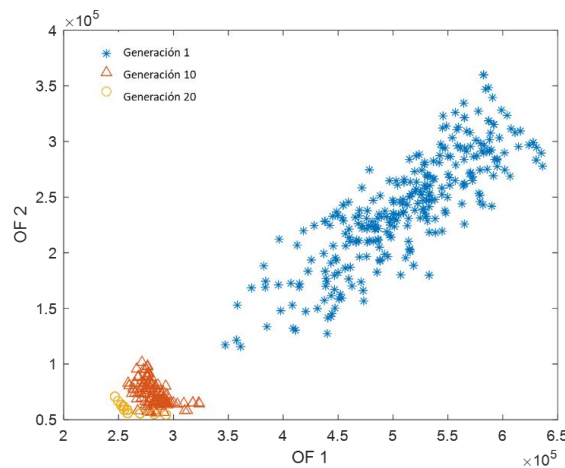


Figura 1. Evolución del frente de Pareto para la simulación en la que la FO1 representa el coste total y la FO2 representa la categoría de impacto cambio climático

Tabla 1. Soluciones de dimensionamiento del sistema híbrido con resultados más equilibrados para ambas funciones-objetivo obtenidas para cada una de las simulaciones

Solución*1	Coste total (€)	PAT (kW)	FV (kW)	Baterías (*10 <sup>3</sup> Ah)	Generador (kW; días)	Dispositivos eléctricos	Ratio energía aprovechada*2
1-CC	255,050	0.0	66.7	405.4	48; 14	14 H, 9 V	36%
3-ER	267,227	1.1	70.3	438.3	48; 10	14 H, 9 V	35%
5-MR	317,316	1.5	16.8	54.8	10; 64	14 H, 2 V	37%

\*1 CC (Cambio climático), ER (Recursos energéticos) y MR (Recursos minerales y metales)

\*2 Ratio de energía aprovechada representa el porcentaje del total de energía generada en el año que es consumida, calculado para un año medio

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tabla 2. Impacto ambiental asociado a cada categoría para cada una de las soluciones seleccionadas

Solución	Categorías de Impacto LCA*		
	CC	ER	MR
1- CC	197	2,999	0.045
3- ER	181	2,656	0.048
5-MR	599	11,032	0.011

\*Impactos ambientales expresados en relación a 1 kWh de energía aprovechada: g CO<sub>2</sub> eq. /kWh (CC), kJ/kWh (ER); y g Sb eq./kWh (MR).

El menor coste total se obtuvo para la simulación que consideró la categoría de impacto CC, donde se combinaron una planta FV de 67 kW, con un banco de baterías y todas las herramientas y vehículos eléctricos. Esta solución incluyó un generador diésel de 48 kW, requerido ocasionalmente (14 días al año), como sistema de apoyo. La solución con mayor coste fue la que centró la FO 2 en la categoría de impacto de MR. En esta solución, la mayor parte de los vehículos se definieron de combustión (lo que conllevó un consumo de combustible superior), y el sistema de suministro de energía se compuso de una planta FV mucho menor (17 kW), combinada con un banco de baterías de capacidad 7 veces inferior, y un generador diésel de 10 kW de potencia, requerido 1/6 parte de los días del año. Las tres soluciones mostraron un coste total entre un 60 y 68% inferior al obtenido si todas las herramientas y vehículos son considerados de combustión, y la única fuente de energía es un generador diésel (modo inicial de operación de esta explotación). En aquellos escenarios enfocados a minimizar las categorías de impacto de CC y ER, en los que se da prioridad a los dispositivos eléctricos, el coste del banco de baterías igualó o incluso superó a la suma del coste de la planta FV y la PAT. La PAT fue incluida en algunas de las soluciones con valores de ambas FO equilibradas, pero su participación fue muy baja. Sin embargo, ésta adquirió una mayor participación (hasta 15 kW) en aquellas soluciones con valor mínimo para la FO 2 (impacto ambiental), presentando un valor más alto para el coste total. Tras comparar el coste de la producción de energía para las tecnologías solar FV y micro-hidráulica, se observó que el coste medio de producción de energía era muy distinto, razón principal que motiva la exclusión ésta última en muchas soluciones. En el caso de la PAT, se obtuvo un coste de 0.12 €/kWh (para 15 kW), considerando que la PAT representa un 26% del coste total de la planta de recuperación de energía [15], y que ésta solo puede generar energía durante las horas de riego. Sin embargo, se comprobó que este coste podría reducirse hasta los 0.09 €/kWh para plantas de mayor capacidad, e incluso a 0.05 €/kWh si el coste de la PAT se considera un 48% del total del coste de la planta de recuperación de energía [15]. En el caso de la tecnología FV, este coste fue de 0.02 €/kWh para una planta de 73 kW de potencia, si toda la energía generada es aprovechada, viéndose este coste más que duplicado si el consumo de la energía es parcial. El ratio de energía aprovechada total fue de hasta el 37% para algunas de las soluciones propuestas, valor muy superior al obtenido en análisis anteriores para sistemas en aislada basados en energías renovables y aplicados al sector de la agricultura de regadío [5], lo que demuestra la posibilidad de incrementar la rentabilidad del sistema de generación de energía.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**4. CONCLUSIONES**

Este trabajo presenta un modelo para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de suministro energético para la agricultura de regadío, basado en criterios ambientales y económicos. Si bien el caso de estudio seleccionado no posee una demanda específica de energía proveniente del bombeo del agua de riego (aunque sí de otros elementos relacionados con la gestión de la red y que dependen del patrón de funcionamiento de ésta), éstas podrían ser incluidas para la simulación de otros casos de estudio.

En la simulación del modelo para el caso de estudio, se obtuvo el menor coste e impacto ambiental para las simulaciones en las que la FO 2 minimiza los impactos de cambio climático y uso de recursos minerales y metales, representando aquellas propuestas que dan prioridad al uso de las energías renovables y minimizan el consumo de combustibles fósiles. Estas soluciones presentaron mayor impacto vinculado al uso de recursos minerales y metales, debido a la demanda de materiales requeridos para la producción de energía solar FV, microhidráulica y baterías. Esto podría cuestionar la idoneidad de algunas soluciones técnicas, siendo necesario explorar la posibilidad de reutilizar o reciclar parte de los materiales requeridos (de los módulos FV, por ejemplo) tras el final de su vida útil. El coste variable de la energía generada por las distintas fuentes renovables tuvo un gran impacto en el diseño de las soluciones. Por ello, una reducción en el coste de la energía microhidráulica podría influir significativamente en el dimensionamiento del sistema, aumentando la participación de esta tecnología. El patrón de producción de la energía solar FV fue el principal factor limitante de esta tecnología para el abastecimiento en aislada, alcanzando un aprovechamiento máximo de la energía generada del 37%, requiriendo además una importante inversión en baterías, lo que sugiere la necesidad de buscar alternativas para el almacenamiento de energía más sostenibles.

**AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se ha realizado dentro del marco de las Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español (Margarita Salas, NextGeneratioEU), y el proyecto PID2020-115998RB-C21 (Ministerio de Ciencia e Innovación de España). Los autores agradecen los datos e información facilitada por el proyecto REDAWN (Programa Interregional del Área Atlántica 2014-2020 EAPA\_098).

**REFERENCIAS**

- [1] EEA, Greenhouse gas emissions by aggregated sector, Eur. Environ. Agency. (2019). <https://www.eea.europa.eu> (accessed June 7, 2021).
- [2] A. Mérida García, J. Gallagher, A. McNabola, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, J.A. Rodríguez Díaz, Comparing the environmental and economic impacts of on- or off-grid solar photovoltaics with traditional energy sources for rural irrigation systems, *Renew. Energy*. 140 (2019) 895–904. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.122>.
- [3] U. Desideri, S. Proietti, F. Zepparelli, P. Sdringola, S. Bini, Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems, *Appl. Energy*. 97 (2012) 930–943. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.055>.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [4] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, Z. Fang, Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm, *Sol. Energy*. 82 (2008) 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005>.
- [5] A. Mérida García, J. Gallagher, M. Crespo Chacón, A. Mc Nabola, The Environmental and Economic Benefits of a Hybrid Hydropower Energy Recovery and Solar Energy System (PAT-PV), under varying energy demands in the Agricultural Sector, *J. Clean. Prod.* 303 (2021) 127078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127078>.
- [6] S. Ali, C.M. Jang, Optimum design of hybrid renewable energy system for sustainable energy supply to a remote Island, *Sustain.* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12031280>.
- [7] H. Shahinzadeh, A. Gheiratmand, S.H. Fathi, J. Moradi, Optimal design and management of isolated hybrid renewable energy system (WT/PV/ORES): A Case Study of Kish Island, 21st Electr. Power Distrib. Netw. Conf. EPDC 2016. (2016) 208–215. <https://doi.org/10.1109/EPDC.2016.7514808>.
- [8] S. Abedi, A. Alimardani, G.B. Gharehpetian, G.H. Riahy, S.H. Hosseinian, A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 1577–1587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.030>.
- [9] D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, L.G. Papageorgiou, Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment, *Energy*. 85 (2015) 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.036>.
- [10] M. Crespo Chacón, J.A. Rodríguez Díaz, J. García Morillo, A. McNabola, Pump-as-turbine selection methodology for energy recovery in irrigation networks: Minimising the payback period, *Water (Switzerland)*. 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/w11010149>.
- [11] M. Crespo Chacón, J.A. Rodríguez Díaz, J. García Morillo, A. Mc. Nabola, Evaluation of a micro hydropower plant design and performance in a pressurised irrigation network: real world application in Southern Spain, *Renew. Energy. Under Rev.* (2020).
- [12] Ecoinvent, In: SimaPro, a.v (Ed.). Ecoinvent Database Version 3., (2014).
- [13] K. Deb, S. Pratab, S. Agarwal, T. Meyarivan, A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6 (2002) 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [14] D. Mitrovic, D. Novara, J. García Morillo, J.A. Rodríguez Díaz, A. Mc Nabola, Prediction of Global Efficiency and Economic Viability of Replacing PRVs with Hydraulically Regulated Pump-as-Turbines at Instrumented Sites within Water Distribution Networks, *J. Water Resour. Plan. Manag.* 148 (2022) 1–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001483](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001483).
- [15] I. Fernández García, D. Novara, A.M. Nabola, A model for selecting the most cost-effective pressure control device for more sustainable water supply networks, *Water (Switzerland)*. 11 (2019). <https://doi.org/10.3390/w11061297>.



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes