

PE-03-2023

Comunicación científico-técnica

## Optimización de sistemas híbridos de abastecimiento de energía para riego en aislada

## Optimisation of hybrid energy supply systems for off-grid irrigation farms

Mérida García, A.<sup>1</sup>; Gallagher, J.<sup>2</sup>; McNabola, A.<sup>3</sup>; Rodríguez Díaz, J.A. <sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Dep. de Agronomía, Área Hidráulica y Riegos, Universidad de Córdoba. [g82megaa@uco.es](mailto:g82megaa@uco.es)

<sup>2</sup> Dep. of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College Dublin. [J.Gallagher@tcd.ie](mailto:J.Gallagher@tcd.ie)

<sup>3</sup> Dep. of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College Dublin. [amcnabol@tcd.ie](mailto:amcnabol@tcd.ie)

<sup>4</sup> Dep. de Agronomía, Área Hidráulica y Riegos, Universidad de Córdoba. [jarodriguez@uco.es](mailto:jarodriguez@uco.es)

### Resumen:

Este trabajo presenta un modelo para el dimensionamiento óptimo de un sistema de suministro de energía híbrido basado en las energías renovables solar fotovoltaica y micro-hidráulica, enfocado a la reducción del coste total y del impacto ambiental.

El modelo desarrollado emplea una versión modificada del algoritmo genético NSGA-II. La optimización contempla el dimensionamiento de una planta de recuperación de energía (PAT-Pump As Turbine) y una planta solar fotovoltaica, como principales fuentes de energía, haciendo uso de baterías y un generador diésel como sistemas de apoyo. Además, el algoritmo decide si las herramientas y vehículos requeridos para el funcionamiento de la explotación, además de las demandas dependientes de la instalación de riego, son eléctricos o de combustión, para cada una de las soluciones propuestas.

El modelo fue aplicado a un caso de estudio en una explotación de nogal de regadío en Palma del Río (Córdoba), mostrando un conjunto de posibles soluciones óptimas que minimizan el coste de inversión y el impacto ambiental del sistema de suministro energético. En aquellos escenarios enfocados a minimizar las categorías de impacto de cambio climático, y recursos energéticos, 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 fotovoltaica y la planta de recuperación de energía micro-hidráulica. La planta microhidráulica fue incluida en algunas de las soluciones, pero su participación fue muy baja, adquiriendo mayor participación en aquellas soluciones con valor mínimo para la función objetivo dos (impacto ambiental), presentando un valor más alto para el coste total. El porcentaje de



# XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



energía aprovechada, frente al total de energía generada, 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.

Se observó que el coste de la energía generada asociado a cada tecnología tuvo un impacto significativo en el dimensionamiento y configuración del sistema. Por ello, la energía microhidráulica, con un mayor coste de inversión asociado, en comparación con la energía solar fotovoltaica, tuvo una menor participación en las soluciones óptimas con valores más balanceados para ambas funciones objetivo. Además, el patrón de producción de la energía solar fotovoltaica fue identificado como el factor más limitante para esta tecnología, lo que redujo el porcentaje de aprovechamiento energético y condicionó la dependencia de baterías y combustible. Las baterías supusieron un importante porcentaje del coste total, de hasta el 57%, y contribución al impacto ambiental, que podrían reducirse al introducir otras fuentes de energía renovable complementarias, como la eólica, o sistemas alternativos de almacenamiento de energía. El modelo desarrollado presenta una herramienta útil para el análisis sistemático de posibles configuraciones de un sistema híbrido para la gestión integral de la energía a nivel de parcela en explotaciones aisladas de la red eléctrica.

**Palabras clave:** análisis del ciclo de vida, coste de inversión y funcionamiento, energía fotovoltaica, energía microhidráulica.



---

**Abstract:**

This work presents a model for the optimal sizing of a hybrid energy supply system based on solar photovoltaic and micro-hydro renewable energies, focused on the reduction of the total cost and environmental impact.

The model developed uses a modified version of the NSGA-II genetic algorithm. The optimisation considers the sizing of an energy recovery plant (PAT - Pump As Turbine) and a solar photovoltaic plant as the main energy sources, using batteries and a diesel generator as support systems. In addition, the algorithm decides whether the tools and vehicles required for the operation of the farm, beyond the energy demands that depend on the irrigation installation, are electric or combustion, for each of the proposed solutions.

The model was applied to a case study in an irrigated walnut farm in Palma del Río (Córdoba), showing a set of possible optimal solutions that minimise the investment cost and environmental impact of the energy supply system. In those scenarios focused on minimising the impact categories of climate change and energy resources, in which priority is given to electrical devices, the cost of the battery bank equaled or even exceeded the sum of the cost of the photovoltaic plant and the micro-hydro energy recovery plant. The micro-hydro plant was included in some of the solutions, but its share was very low, acquiring a higher share in those solutions with a minimum value for objective function two (environmental impact), presenting a higher value for the total cost. The percentage of energy used, compared to the total energy generated, was up to 37% for some of the proposed solutions, presenting a significative improvement compared to previous results obtained in other studies focused on stand-alone systems based on renewable energies.

The cost of the energy generated associated with each technology had a significant impact on the sizing and configuration of the system. Thus, micro-hydro power, with a higher associated investment cost compared to solar PV, had a lower share in the optimal solutions with more balanced values for both objective functions. In addition, the production pattern of solar PV was identified as the most limiting factor for this technology, which reduced the percentage of energy used and conditioned the dependence on batteries and fuel. Batteries accounted for a significant percentage of the total cost, up to 57%, and contribution to the environmental impact, which could be reduced by introducing other complementary renewable energy sources, such as wind, or alternative energy storage systems. The model developed presents a useful tool for the systematic analysis of possible configurations of a hybrid system for integrated energy management at farm-scale.

**Keywords:** life cycle assessment, investment and operating cost, photovoltaics, micro-hydro power.

## 1. Introducción

La agricultura representa en torno al 10% de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) globales [1]. En este contexto, las energías renovables plantean una alternativa de suministro energético de baja emisión de GEI para el abastecimiento energético en el sector de la agricultura de regadío. Sin embargo, las tecnologías renovables también tienen asociado un impacto ambiental, vinculado principalmente a la manufactura de los componentes incluidos en la instalación [2]. Este impacto además repercute de manera más significativa en cada kWh de energía útil cuando las actividades que son abastecidas con la energía renovable generada tienen un marcado carácter estacional, como es el caso del riego. Esto es debido a los ratios de energía aprovecha respecto al total de energía generada, que suelen ser muy bajos [3,4]. Sin embargo, se ha observado que, en muchos casos, otras actividades demandantes de energía que tienen lugar en las explotaciones agrícolas (vinculadas al uso de maquinaria y vehículos, principalmente), podrían ser parcial o totalmente abastecidas por energías renovables. No obstante, esto implicaría un redimensionamiento del sistema, considerando un análisis integral de las fuentes de energía y demandas, así como su distribución en el tiempo.

Trabajos previos han llevado a cabo el desarrollo de modelos de dimensionamiento óptimo para el diseño de sistemas híbridos de abastecimiento de energía, cuyo objetivo se centra principalmente, en la reducción del coste total, asegurando satisfacer la demanda de energía [5,6]. Otros trabajos incluyen además aspectos vinculados al impacto ambiental, por medio del análisis del ciclo de vida de algunos diseños preestablecidos [7,8], siendo muy escasas las investigaciones publicadas que lo integran en una metodología de análisis sistemático de posibles soluciones, adaptado a sectores con demanda de energía estacional.

Este trabajo presenta un modelo para la optimización del sistema de abastecimiento energético híbrido basado en el uso de las energías renovables solar fotovoltaica y micro-hidráulica. Además de estas fuentes de energía, se considera la posibilidad de emplear un banco de baterías, y un generador diésel, como sistemas de apoyo. Para ello, el modelo integra una versión modificada del algoritmo genético NGSA-II, cuyas funciones objetivo se centran en criterios económicos y ambientales. El algoritmo arroja una serie de posibles soluciones que incluyen el dimensionamiento de cada una de las fuentes de energía (planta fotovoltaica, planta micro-hidráulica, banco de baterías, generador diésel), seleccionando además el tipo de herramientas y vehículos (eléctricos o de combustión) requeridos para el mantenimiento del cultivo, según la información previa suministrada por el usuario al modelo. Estas soluciones serán aquellas que optimizan la gestión integral energética de la explotación. El modelo desarrollado, fue aplicado a un caso de estudio en la provincia de Córdoba, para el cual se presentan los resultados.

## 2. Materiales y métodos.

### 2.1. Definición del problema.

El objetivo del modelo desarrollado fue generar una herramienta para el análisis sistemático de posibles configuraciones del sistema de abastecimiento de energía híbrido, basado en tecnologías renovables, para la gestión energética integral en explotaciones de regadío aisladas de la red. Para ello, se estableció como objetivo de optimización minimizar el impacto económico y ambiental a lo largo de la vida útil del proyecto, por medio de dos funciones objetivo (FO):

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 (CI) (coste asociado a la adquisición e instalación de la PAT, planta FV, baterías y generador diésel), así como el coste de funcionamiento (CF) (consumo de combustible del generador diésel y herramientas y vehículos de combustión, reemplazo de las baterías, etc.) para el total de años (y) de la vida útil del proyecto.

$$FO1 = \sum_{n=1}^{n=EST} [CI_n + \sum_{y=1}^{y=Y} CF_{n,y}] \quad (1)$$

FO 2: minimizar el impacto ambiental. La FO 2 evaluó la carga ambiental atribuida a cada solución considerando las categorías de impacto (CImp) 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. Este cálculo se hizo de acuerdo al análisis de ciclo de vida (LCA, Life Cycle Assessment) [9], considerando 1 kWh de energía útil como unidad de referencia.

$$FO2 = \sum_{n=1}^{n=EST} [(CImp_{n,i}) + \sum_{y=1}^{y=Y} (CImp_{n,o,y})] \quad (2)$$

### 2.2. Algoritmo multiobjetivo.

El modelo desarrollado se basa en el algoritmo genético NSGA-II [10], 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, que ha de ser identificada en un análisis previo), 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).

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 su 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% [11], 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 (en la localización de cada caso de estudio), 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 diésel para cubrir la demanda de potencia restante, así como el consumo de combustible en función de las horas de funcionamiento.

### 2.3. Caso de estudio.

El modelo fue aplicado a un caso de estudio, una explotación de nogal en regadío de unas 170 hectáreas, perteneciente a la Comunidad de Regantes de la Margen Izquierda del Canal del Genil (Córdoba). En este caso, el agua de riego es suministrada a presión desde la comunidad de regantes. Por ello, las demandas de energía vinculadas a la actividad del riego se corresponden con un sistema de fertirriego, así como una serie de electroválvulas para el control del riego. Estos equipos trabajan de manera coordinada con la red de riego, siendo el tiempo de funcionamiento el mismo, y alcanzando una máxima potencia demandada de 3.6 kW. Este caso de estudio fue analizado en trabajos anteriores [12,13] ([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 [4], 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.

### 3. Resultados y discusión

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 y recolección, principalmente). 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 FO (la más próxima al origen de coordenadas en la representación del frente de Pareto).

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

Solución* <sup>1</sup>	Coste total (€)	PAT (kW)	FV (kW)	Baterías (*10 <sup>3</sup> Ah)	Generador (kW; días)	Dispositivos eléctricos	Ratio energía aprovechada* <sup>2</sup>
1-CC	255050	0,0	66,7	405,4	48; 14	14 H, 9 V	36%
3-ER	267227	1,1	70,3	438,3	48; 10	14 H, 9 V	35%
5-MR	317316	1,5	16,8	54,8	10; 64	14 H, 2 V	37%

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

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

**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 [14], 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 [14]. En el caso de la tecnología FV, este coste fue de 0.02 €/kWh para una planta de 73 kW de potencia, cuando toda la energía generada es aprovechada, viéndose este coste más que duplicado si el consumo de la energía es parcial. La relación de energía aprovechada, con respecto al total de energía generada, 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, lo que demuestra la posibilidad de incrementar la rentabilidad del sistema de generación de energía.

#### 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 energéticos, 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.

## 5. Agradecimientos

El trabajo de investigación sintetizado en este trabajo se ha realizado dentro del marco de las Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español (Margarita Salas, NextGenerationEU), 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 emission intensity of electricity generation in Europe, Eur. Environ. Agency. (2020). <https://www.eea.europa.eu> (accessed March 10, 2021).
- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] 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>.
- [5] 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>.
- [6] 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>.
- [7] 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>.
- [8] 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>.
- [9] Ecoinvent, In: SimaPro, a.v (Ed.). Ecoinvent Database Version 3., (2014).
- [10] 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>.
- [11] 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.



# XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



- 
- [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001483](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001483).
- [12] 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>.
- [13] 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).
- [14] 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>.