

**SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO HÍBRIDOS FV-RED:
APLICACIÓN A RIEGO DIRECTO****Almeida R.H.*, Belouaret J.***, Ledesma J.R.*, Narvarte L.***

*Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia, km. 7, 28031 Madrid, España, rita.hogan@ies.upm.es, javier.ledesma@upm.es, luis.narvarte@upm.es

** Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Carretera de Valencia, km. 7, 28031 Madrid, España, j.belouaret@alumnos.upm.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.3142>

RESUMEN

Este artículo presenta la metodología utilizada en una herramienta de simulación de la productividad de sistemas de riego híbridos fotovoltaico-red, así como su aplicación a un sistema de riego directo en Marrakech, Marruecos. Se trata de una finca de olivar intensivo, cuyas necesidades de riego son 8 horas diarias entre marzo y octubre. La aportación fotovoltaica en ese periodo es de 1456 kWh/kWp, mientras que la red eléctrica tiene que aportar 66 kWh/kWp. Entre los meses de noviembre y febrero toda la energía fotovoltaica es desaprovechada (550 kWh/kWp) puesto que no se riega. Con el objetivo de generalizar el estudio, se analiza la influencia de las necesidades de riego diarias en la aportación FV mediante cuatro simulaciones adicionales para necesidades de riego diarias de 4 h, 10 h, 12 h y 16 h. Por ejemplo, en el mes de junio, y considerando 4 h de riego al día, la aportación FV es 104 kWh/kWp (cuando para las 8 h es 185 kWh/kWp), llegando a 239 kWh/kWp a partir de las 12 h de riego al día.

PALABRAS CLAVE: Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Red, Riego, Simulación

ABSTRACT

This article explains the methodology used in a hybrid photovoltaic-grid irrigation system simulation tool, as well its application to a direct pumping system in Marrakech, Morocco. It is an intensive olive tree cultivation, with a daily irrigation need of 8 hours between March and October. The photovoltaic energy used in this period is 1456 kWh/kWp, while the grid electricity consumption is 66 kWh/kWp. Between November and February, the photovoltaic energy is wasted (550 kWh/kWp). To evaluate the influence of the irrigation needs in terms of the number of irrigation hours per day, four additional simulations were performed – for 4 h, 10 h, 12 h, and 16 h. For example, in June, and considering 4 h of irrigation per day, the photovoltaic energy used is 104 kWh/kWp (while it is 185 kWh/kWp for 8 hours), achieving 239 kWh/kWp from 12 hours of irrigation per day.

KEYWORDS: Hybrid Photovoltaic-Grid Systems, Irrigation, Simulation

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego fotovoltaico (FV) son cada vez más atractivos debido al elevado coste energético de la agricultura modernizada (Carrêlo et al., 2020; Langarita et al., 2017). Las soluciones híbridas, con la red eléctrica o generadores diésel, son necesarias si la red de riego requiere un número de horas de riego superior al número de horas de sol (Almeida et al., 2018). También son una solución interesante si hay picos de riego estacionales (Hartung y Pluschke, 2018) y como estrategia para solucionar problemas asociados a la intermitencia de la potencia FV (Jones y Olsson, 2017; Lau et al., 2010).

Los principales componentes de un sistema de riego fotovoltaico son: generador fotovoltaico, variador de frecuencia, conjunto motor-bomba, balsa o red de riego (Abella et al., 2003). Los sistemas fotovoltaicos híbridos son la combinación de los sistemas fotovoltaicos aislados (que alimentan las bombas exclusivamente con un generador fotovoltaico) con otro tipo de fuentes de energía eléctrica auxiliares como la red eléctrica convencional y generadores diésel. En este caso, el variador de frecuencia es alimentado a la vez por el generador fotovoltaico y la fuente auxiliar (ver Fig. 1.).

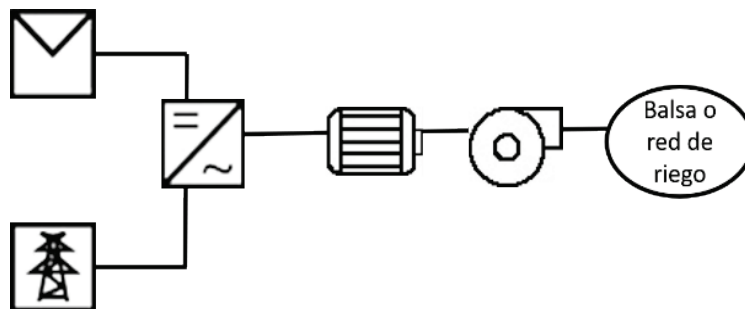


Fig.1. Componentes de un sistema de riego híbrido fotovoltaico-red: el generador FV y la red eléctrica alimentan, a la vez, el variador de frecuencia. A la salida del variador de frecuencia se encuentra el motor, seguido de la bomba y de la balsa o red de riego.

Adicionalmente, es importante considerar que hay dos tipos principales de sistemas de riego: sistemas a balsa (que funcionan a presión y caudal variable) y sistemas directos (a presión y caudal constante y, por tanto, a potencia constante). En un sistema de riego FV a balsa, el sistema ajusta, en cada instante, el caudal bombeado al nivel de irradiancia solar disponible. Por otro lado, en un sistema FV directo (riego por goteo, pivotes o aspersores), la potencia instantánea del generador fotovoltaico tiene que ser constante una vez que la potencia demandada es constante.

Los principales objetivos de este artículo son describir la metodología utilizada en una herramienta de simulación de sistemas de riego FV híbridos con la red eléctrica que puede ser aplicada a los dos tipos de aplicaciones de riego existentes en el mercado – a balsa y directos –, así como su aplicación a un sistema de riego FV directo en Marrakech, Marruecos.

METODOLOGÍA – SISIFO

SISIFO es el simulador de sistemas fotovoltaicos del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid (Carrillo et al., 2015) y está disponible en www.sisifo.info. SISIFO tenía, con anterioridad a este trabajo, la capacidad de simular la productividad de sistemas FV conectados a la red y sistemas de riego FV aislados.

Este artículo describe las características principales de una nueva funcionalidad: la simulación de la productividad de sistemas híbridos de riego FV, calculando la aportación de cada una de las fuentes de energía, así como la energía FV desaprovechada.

Es importante señalar que, a diferencia de los sistemas FV conectados a la red, en un sistema de riego FV hay pérdidas de energía asociadas a las limitaciones que imponen tanto el propio sistema de riego (potencias mínima y máxima de funcionamiento de la bomba) como el cultivo (por ejemplo, las necesidades de riego del cultivo condicionan el número de horas de riego al día y el periodo de riego a lo largo del año).

Así, la nueva versión de SISIFO permite la simulación de la productividad de sistemas de riego híbridos FV en función de:

- a) Periodo de riego (esto es, los meses del año en que es necesario regar);
- b) Número de horas de riego al día;

c) Período tarifario (restrigiendo el consumo de la red en determinados periodos tarifarios – por ejemplo, en España, un usuario final con tarifa 6.1A, que cuenta con seis periodos horarios P1, P2, P3, P4, P5, P6, puede decidir que sólo quiere utilizar la red eléctrica en P6, que es el tramo tarifario más barato).

En este artículo se consideran los dos primeros condicionantes.

Es importante mencionar que, en el momento de la escritura del presente artículo, la versión disponible online de SISIFO aun no incluye esta nueva funcionalidad, pero la simulación de la productividad de sistemas híbridos de riego FV estará disponible brevemente.

Sistemas de Riego Directo

En los sistemas de riego directo, la potencia demandada por el sistema de riego es constante durante las horas de riego (P_{BOMBEO}). La Fig. 2. incluye las curvas de P_{BOMBEO} y de la potencia de un sistema fotovoltaico que trabaja en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico (P_{MPP}) sobre un seguidor eje norte-sur horizontal en el día 2 de julio del año meteorológico típico en Marrakech. Tal y como se observa en la Fig. 2., y aunque la P_{MPP} varíe durante el día, la P_{BOMBEO} se mantiene constante durante el rango de horas seleccionado por el agricultor (desde las 6 h hasta las 15 h, hora oficial de Marrakech). Antes de las 8 h, el sistema FV no es capaz de aportar la potencia constante demandada por el sistema de riego, sin embargo, entre las 8 h y las 15 h el sistema FV es capaz de entregar más potencia que la demandada. La diferencia entre estas dos potencias está en el origen del desaprovechamiento de cierta cantidad de energía fotovoltaica en este tipo de sistemas de riego FV. Obsérvese que, entre las 6 h y las 9 h, la potencia FV no alcanza la potencia constante demandada y, como consiguiente, es necesario complementar la potencia FV con la de una fuente auxiliar.

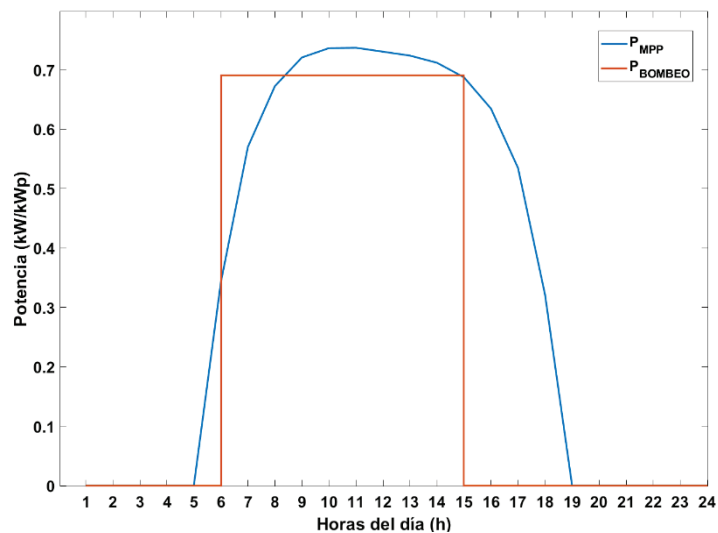


Fig. 2. Potencia en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico (P_{MPP}) y potencia demandada por un sistema de riego fotovoltaico a presión constante (P_{BOMBEO}) a lo largo del día 2 de julio. Las potencias están normalizadas a la potencia pico del generador FV.

La potencia fotovoltaica consumida en el sistema de riego híbrido FV (P_{FV}) no será siempre igual a la P_{MPP} , si no que será influenciada por factores ajenos al sistema FV como son, por ejemplo, las características del sistema de riego, el cultivo y el comportamiento del agricultor. P_{FV} se calcula a través de la Ec.1.

$$P_{FV}(h, d) = \begin{cases} P_{MPP}(h, d), & P_{MPP}(h, d) \leq P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, & d \in IP \\ P_{BOMBEO}(h, d), & P_{MPP}(h, d) > P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, & d \in IP \\ 0, & h \notin IH, & d \notin IP & \end{cases} \quad (1)$$

donde h y d representan, respectivamente, hora y día, IP es el periodo de riego (del inglés *irrigation period*) y IH son las horas de riego (del inglés *irrigation hours*).

La integral de la P_{FV} (E_{FV}) en el día 2 de julio, y para un riego de 6 h a 15 h, se puede observar en color amarillo en la Fig. 3.

En cada día del IP, pueden existir dos tipos de desaprovechamientos (ver Fig. 3.):

- a) La potencia FV no aprovechada dentro del periodo de riego con el riego activado – P_{na1} – que es la diferencia entre la potencia instantánea que podría entregar el generador FV en el punto de máxima potencia, P_{MPP} , y la que demanda el sistema de riego a presión constante, P_{BOMBEO} (Ec. 2). La suma de estos desaprovechamientos (E_{na1}) está representada en la Fig. 3. en color azul, ocurriendo entre las 8 h y las 15 h.

$$P_{na1}(h, d) = \begin{cases} P_{MPP}(h, d) - P_{BOMBEO}(h, d), & P_{MPP}(h, d) > P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, & d \in IP \\ 0, & P_{MPP}(h, d) \leq P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, & d \in IP \end{cases} \quad (2)$$

- b) La potencia FV no aprovechada dentro del periodo de riego con el riego desactivado – P_{na2} – es decir, la potencia FV que se podría generar durante las horas del día en que el sistema de riego está parado porque no se desea regar. En estos momentos, el desaprovechamiento es equivalente a la P_{MPP} (Ec. 3) y su integral (E_{na2}) se representa en la Fig. 3. en color gris, sucediendo entre las 5 h y las 8 h y entre las 15 h y las 19 h.

$$P_{na2}(h, d) = P_{MPP}(h, d), \quad h \notin IH, \quad d \in IP \quad (3)$$

Cuando el riego está activado y no hay potencia FV suficiente para satisfacer la potencia constante demandada por el sistema de riego, la red eléctrica aportará la potencia complementaria necesaria en cada instante. La Ec. (4) describe la potencia que aporta la red (P_{RED}) como la diferencia entre la P_{BOMBEO} y la P_{MPP} . Esta aportación está representada en la Fig. 3. en color morado (E_{RED}).

$$P_{RED}(h, d) = \begin{cases} P_{BOMBEO}(h, d) - P_{MPP}(h, d), & P_{MPP}(h, d) < P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, d \in IP \\ 0, & P_{MPP}(h, d) \geq P_{BOMBEO}(h, d), & h \in IH, & d \in IP \end{cases} \quad (4)$$

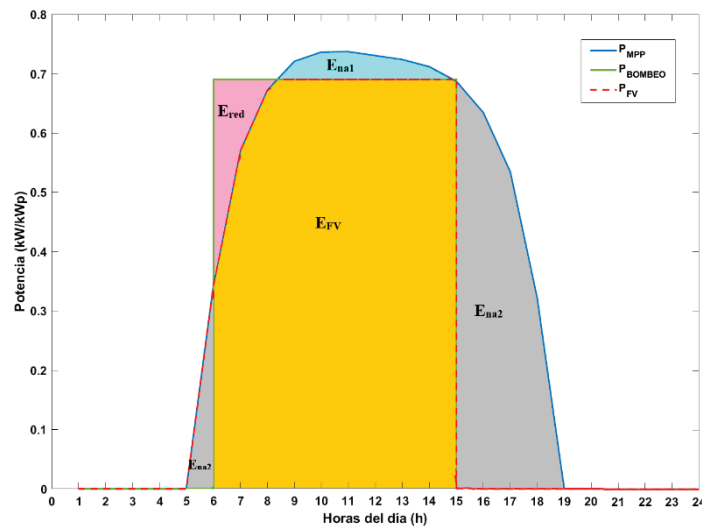


Fig. 3. Representación del funcionamiento de un sistema de riego a presión y caudal constantes a lo largo de un día (2 de julio) con 9 horas de riego – el sistema de riego está activado de 6 h a 15 h. El área en amarillo representa la energía FV utilizada, mientras que el área en azul representa la energía FV desaprovechada con el riego activado y que el área en gris representa la energía FV desaprovechada con el riego desactivado. En morado se representa la energía proveniente de la red eléctrica.

Por otro lado, también se desaprovecha toda la potencia fotovoltaica disponible, P_{MPP} , en los días en que no hay riego, P_{na3} , Ec. (5).

$$P_{na3}(h, d) = P_{MPP}(h, d), \quad d \notin IP \quad (5)$$

SISIFO calcula los valores instantáneos de cada uno de estos parámetros para todos los días y horas del año. Obviamente las energías diarias, mensuales y anuales son obtenidas como la suma de las potencias en el intervalo de tiempo considerado.

Sistemas a Balsa

En un sistema a balsa, el aprovechamiento de la energía FV tiende a ser más grande que en un sistema directo. Esto ocurre pues, en este caso, el variador de frecuencia tiene implementado un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia con el objetivo de maximizar el volumen de agua bombeado. Por tanto, en un sistema híbrido FV-red sólo existirán desaprovechamiento de energía FV en dos situaciones concretas:

- a) Si las horas de riego son menores que las horas en que existe disponibilidad de recurso solar
- b) Si el sistema está sobredimensionado y, por tanto, hay más potencia FV disponible que la potencia demandada por la bomba trabajando a su frecuencia máxima.

CASO DE ESTUDIO – SISTEMA DIRECTO EN MARRAKECH

La herramienta de simulación presentada se aplica al caso de estudio de un sistema de riego directo instalado en una finca de 233 ha de olivar intensivo, en Marrakech, Marruecos (ver Fig. 4.).

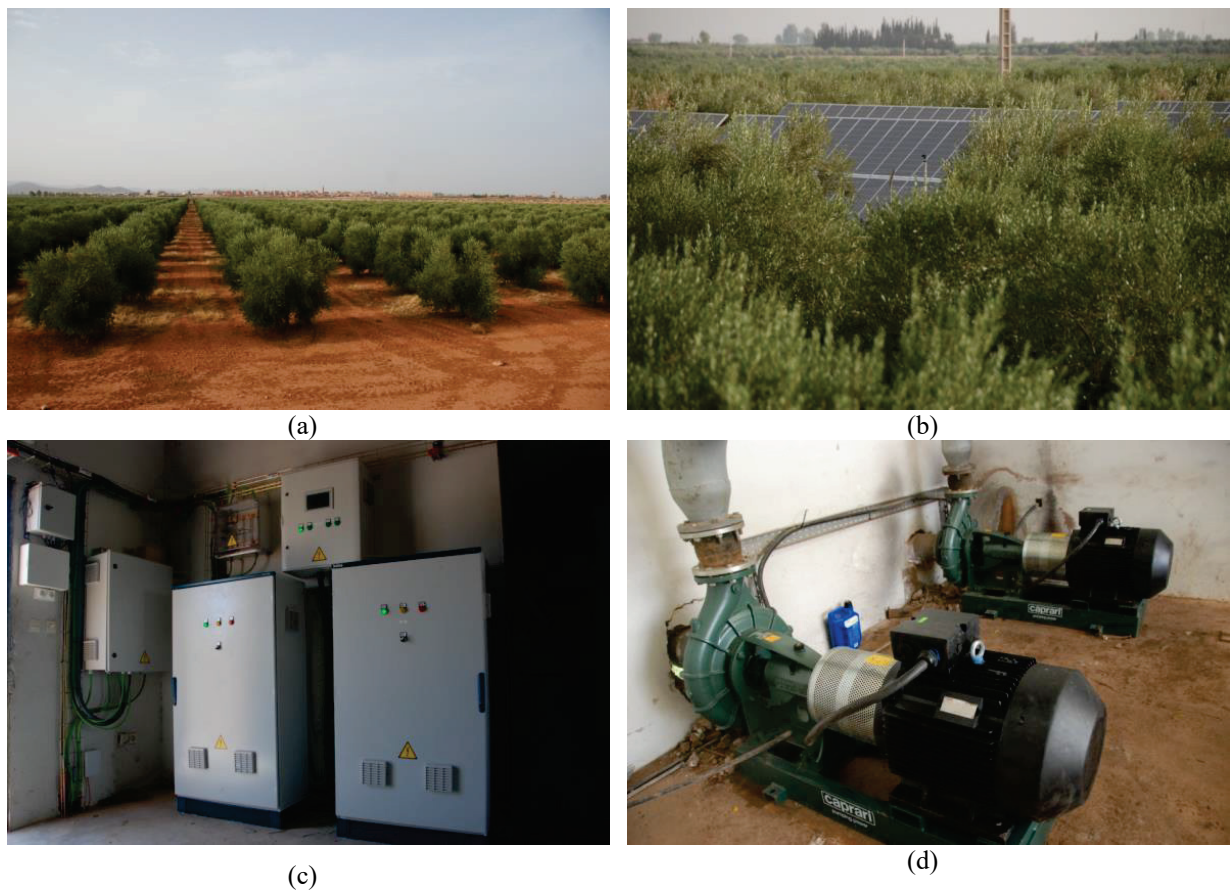


Fig. 4. Fotografías del sistema de riego FV instalado en Marrakech, Marruecos: (a) olivar, (b) parte del generador FV, (c) variadores de frecuencia y cuadros de control, (d) conjuntos motor-bomba.

El sistema cuenta con:

- a) Generador FV de 120 kWp, eléctricamente dividido en dos de 60 kWp, en un seguidor de eje norte-sur horizontal;
- b) Dos conjuntos motor-bomba de 45 kW (Caprari – MEC-AS4/125C+ FELM 45KW 4P);
- c) Dos variadores de frecuencia de 55 kW (Omron 3G3RX-A4550);
- d) Programador de riego (Agronic 4000);
- e) Una red de riego por goteo que debe trabajar a 380 m³/h y 4.2 bar.

El sistema debe bombear 8 horas de riego diarias entre los meses de marzo y octubre.

RESULTADOS

En la Fig. 5. se muestra la producción FV utilizada en el sistema de riego (E_{FV}), la energía FV desaprovechada durante el periodo de riego con el riego activado (E_{na1}) y desactivado (E_{na2}), así como la energía FV desaprovechada fuera de este periodo (E_{na3}). También se presenta la aportación de la red eléctrica (E_{red}).

La E_{FV} es 1456 kWh/kWp (producidos entre marzo y octubre), siendo desaprovechados (E_{na3}) alrededor de 550 kWh/kWp en los meses en que no hay riego (enero, febrero, noviembre y diciembre). La red eléctrica tiene que aportar 66 kWh/kWp para suministrar las necesidades del cultivo – esta aportación es inferior a 3 kWh/kWp entre abril y julio, siendo la mayor aportación en el mes de octubre, con 31 kWh/kWp.

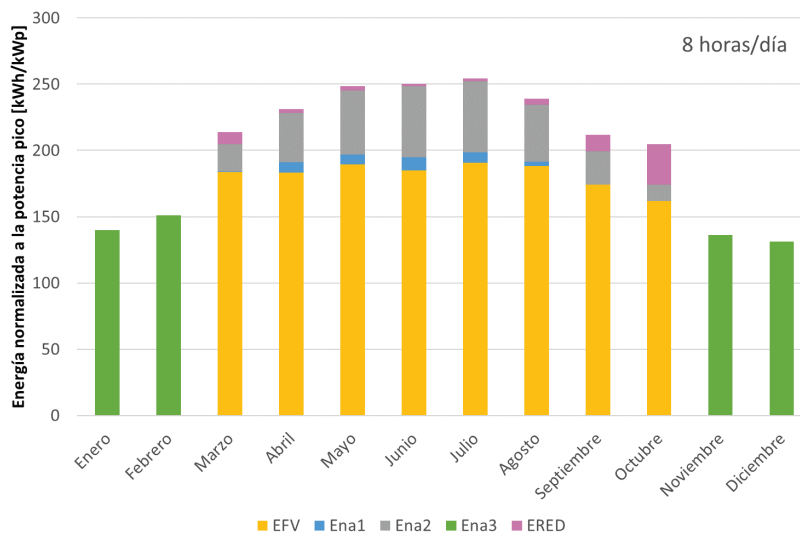


Fig. 5. Energías mensuales normalizadas a la potencia pico de la instalación.

Influencia del número de horas de riego al día

Con el objetivo de analizar la influencia del número de horas de riego al día en la producción FV, la Tabla 1 incluye la energía FV normalizada a la potencia pico, así como la aportación de la red eléctrica para 4, 8, 10, 12 y 16 horas de riego al día en el mes de junio. Se verifica que:

- Con 4 horas de riego al día el sistema puede funcionar 100% FV utilizando 104 kWh/kWp, con un desaprovechamiento de energía FV de 145 kWh/kWp (la suma de E_{na1} y E_{na2}), que representa un 58% de la potencia FV total disponible;
- Con 8 horas empieza a ser necesaria la aportación de la red eléctrica pero el desaprovechamiento FV baja al 26%;
- A partir de las 8 horas, la E_{na1} es siempre la misma (representando el desaprovechamiento por exceso de potencia FV disponible en las horas de mayor irradiancia);
- A partir de las 12 horas no existe energía FV desaprovechada con el riego desactivado – E_{na2} . Con 12 horas de riego, el desaprovechamiento es de tan solo del 4% y la aportación de la red se limita al 11% del total del consumo de las bombas.

Tabla 1. Energía normalizada a la potencia pico en el mes de junio en función del número de horas de riego diario.

Horas de riego al día (h)	4	8	10	12	16
E_{FV} (kWh/kWp)	104	185	219	239	239
E_{na1} (kWh/kWp)	8	10	10	10	10
E_{na2} (kWh/kWp)	137	54	20	0	0
E_{RED} (kWh/kWp)	0	1	9	30	113

CONCLUSIONES

Este artículo detalla la metodología utilizada para desarrollar una herramienta de simulación de sistemas de riego FV híbridos con la red eléctrica (que puede ser aplicada tanto a sistemas a balsa como directos). También se presenta, como caso de estudio, su aplicación a un sistema de riego directo en Marrakech.

La simulación de sistemas híbridos de riego FV se ha integrado en SISIFO, el simulador de sistemas fotovoltaicos del Instituto de Energía Solar, que calcula la productividad de estos sistemas en función del período de riego y del número de horas de riego al día.

A modo de caso de estudio, se ha utilizado esta herramienta para la simulación de la productividad de un sistema híbrido fotovoltaico-red instalado en una finca de 233 ha de olivar intensivo en Marrakech, Marruecos, donde el riego por goteo es necesario durante 8 horas al día de marzo a octubre. La aportación FV anual es 1456 kWh/kWp, siendo desaprovechados cerca de 550 kWh/kWp en los meses en que no hay riego. La red eléctrica tiene que aportar 66 kWh/kWp. Por ejemplo, en el mes de junio, la aportación FV llega a los 185 kWh/kWp, siendo desaprovechados 64 kWh/kWp y aportando la red eléctrica solamente 1 kWh/kWp.

Variando el número de horas de riego al día se verifica que, en el mes de junio, la aportación FV bajaría a 104 kWh/kWp considerando solamente 4 horas de riego al día (y la aportación de la red eléctrica sería nula). Por otro lado, también se verifica que la aportación FV máxima considerando el generador FV instalado es de 239 kWh/kWp (valor observado para 12 h y 16 h de riego al día). Obviamente, el incremento del número de horas de funcionamiento diario lleva a un incremento de la utilización del FV (hasta las 10 h) y a un incremento de la utilización de la red (que llega, en el mes de junio y para 16 horas al día, a 113 kWh/kWp). Es interesante destacar el caso de los 12 h de riego, en el que el desaprovechamiento FV es de tan solo 4% y la aportación de la red se limita al 11%.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el programa de investigación e innovación del Horizonte2020 de la Unión Europea a través del proyecto Fostering a Next GeneRation of European Photovoltaic SoCiety (GRECO), bajo el acuerdo de concesión nº 787289, y por el proyecto MADRID-PV2 (P2018/EMT-4308), financiado por la Comunidad de Madrid con el apoyo de fondos FEDER.

REFERENCIAS

- Abella M. Alonso, Lorenzo E., Chenlo F. (2003). PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converters, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11, 179-191.
- Almeida R., Carrêlo I., Lorenzo E., Narvarte L., Fernández-Ramos J., Martínez-Moreno F., Carrasco, L.M. (2018). Development and Test of Solutions to Enlarge the Power of PV Irrigation and Application to a 140 kW PV-Diesel Representative Case, *Energies* 11 (12), 3538.
- Carrêlo I. B., Almeida R. H., Narvarte L., Martínez-Moreno F., Carrasco L. M. (2020). Comparative analysis of the economic feasibility of five large-power photovoltaic irrigation systems in the Mediterranean region, *Renewable Energy* 145, 2671-2682.
- Carrillo J.M., Muñoz J., Makibar A., Luna A., Narvarte L. (2015). [SISIFO: the open-source simulation tool of PV systems developed in PVCROPS](#). *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 14-18 septiembre, Hamburgo, Alemania.
- Hartung H., Pluschke L. (2018). The benefits and risks of solar-powered irrigation – a global overview. *Food and Agriculture Organization of the United Nations and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*, Rome.
- Jones L.E., Olsson G. (2017). Solar Photovoltaic and Wind Energy Providing Water. *Global Challenges*, 1, 5.
- Langarita R., Chóliz J. S., Sarasa C., Duarte R., Jiménez S. (2017). Electricity costs in irrigated agriculture: A case study for an irrigation scheme in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, part 2, 1008-019.
- Lau K.Y., Yousof F.M., Arshad S.N.M., Anawari M., Yatim A.H.M. (2010). Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy systems under Malaysian conditions. *Energy*, 35, 3245-3255.