



OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE UNA RED DE RIEGO A PRESIÓN CONSTANTE

Martín Calero Lara^{1,2}, Francisco J. Casares de la Torre¹,
Rafael López Luque¹

¹Universidad de Córdoba, España

²martin.calero@uco.es

RESUMEN

En el sistema de riego fotovoltaico autónomo de bombeo directo el agua que necesita el cultivo se bombea desde un reservorio directamente a la red de riego utilizando la energía generada por un conjunto de módulos fotovoltaicos, sin necesidad de almacenamiento intermedio de agua o de energía eléctrica. La radiación solar que incide en los módulos es de naturaleza estocástica y dificulta la gestión de la oferta y demanda de energía en estas instalaciones autónomas.

La metodología seguida considera las necesidades diarias de agua, según la programación de riego del cultivo realizada, el balance de agua en el suelo de la finca, el comportamiento hidráulico de la red de riego, el rendimiento de los dispositivos de conversión de la energía y la potencia fotovoltaica generada.

Se ha llegado a la conclusión de que el diseño óptimo para una finca de 13,5 ha dedicada a olivar en intensivo, con una red de riego dividida en cuatro sectores con emisores compensados es con riego multisectorial de hasta tres sectores, con goteros de 2,2 l/h, que requiere de una bomba de potencia 37 kW con un GFV de 38,25 kWp, alcanzándose una *EuE* del 27,92% anual.

Palabras clave

Fotovoltaica, Optimización, Riego

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua y el incremento de la producción de alimentos para la población mundial requiere de un uso eficiente del agua. Los sistemas de riego de precisión con redes presurizadas han demostrado ser adecuados para la reducción del uso del agua, pero también supone mayores requerimientos energéticos [1]. Generalmente se utiliza energía eléctrica que proviene de la red de distribución o de un alternador movido por motor diésel. El incremento notable del uso de estas energías ha provocado un aumento considerable de las emisiones de CO₂.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

La energía solar fotovoltaica para el bombeo de agua para riego es una alternativa prometedora a los sistemas de bombeo convencionales que utilizan fuentes de energía eléctrica y combustible [2].

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los sistemas basados en energías renovables es el patrón estacional de la demanda de los cultivos [3], [4] y la variabilidad de la producción de energía renovable.

De los distintos tipos de riego fotovoltaico, en este trabajo se considera el riego directo multisectorial, que consiste en la posibilidad de operar un número variable de sectores de riego simultáneamente [5]. El sistema está formado por un Generador Fotovoltaico (GFV) que proporciona la electricidad, un convertidor de frecuencia que modifica la velocidad de giro del motor eléctrico que mueve a una bomba para elevar el agua y dar presión a la red de riego y un conjunto de electroválvulas que controlan el riego a los diferentes sectores.

En [6], [7] se propone un modelo de gestión del sistema de riego fotovoltaico en el que se introduce la utilización de una *Matriz de Trabajo Diaria (MTD)* que permite determinar diariamente una prioridad de riego de los sectores y también el balance de agua en el suelo de la finca.

2. OBJETIVOS

Optimizar el tamaño del GFV y la red de riego de la finca. Encontrar el GFV que satisface el riego de la finca modificando la cantidad máxima de sectores en riego simultáneo y el caudal de los emisores.

3. MATERIALES Y MÉTODO

3.1 CASO DE ESTUDIO. FINCA CON RIEGO POR GOTEO A PRESIÓN CONSTANTE.

La finca del caso de estudio se ubica en el municipio de Estepa, en la comarca Sierra Sur de Sevilla (37°26' N, 4°52' O) a 157 m.s.n.m., en el Sur de España. Esta dedicada al cultivo de olivar intensivo de 13,49 ha (1333 olivos/ha) con plantas de 12 años de edad (*Olea Europea*, var. *Arbequina*). Tiene clima mediterráneo subtropical, en el que predomina una elevada temperatura estival y escasez de precipitaciones, más abundantes en otoño y primavera. La temperatura media anual oscila entre 14 °C y 19 °C, estando la temperatura media en el mes más frío entre 6 °C y 10 °C, y la media en el mes más cálido entre 21°C y 30 °C. Los meses que registran las temperaturas más bajas son diciembre, enero y febrero coincidiendo con unas precipitaciones relativamente altas, principalmente en noviembre. En julio y agosto se llega a alcanzar los 36 °C.

La finca dispone de un sistema de regadío dividido en cuatro sectores tomando el agua desde el río Genil y llegando a cada sector a través de un distribuidor situado aproximadamente en el centro de la parcela de riego (ver figura 1). El terreno es ascendente desde la ribera del río Genil con pendiente media del 5,5%.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

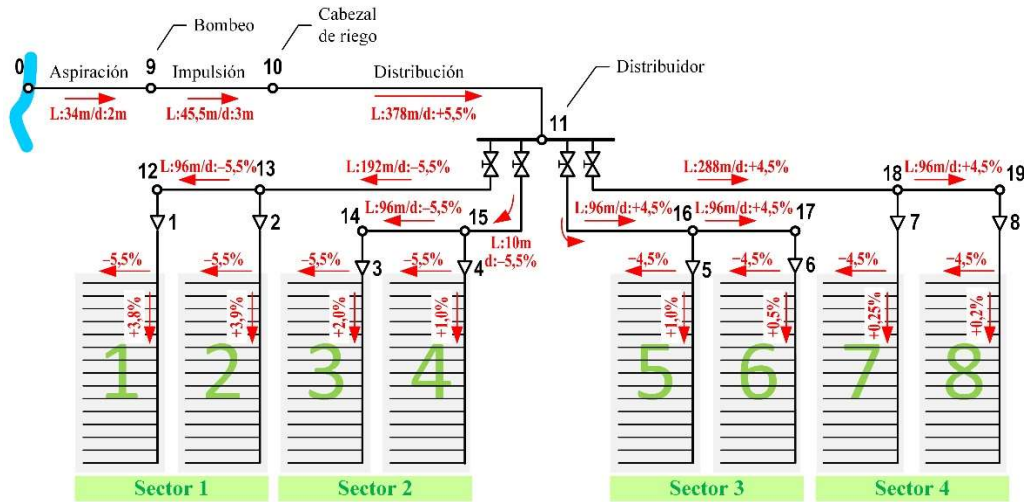


Figura 1. Esquema de la red de riego de la finca dividida en ocho subunidades de riego y cuatro sectores, alimentados desde el distribuidor. L es la longitud de cada tramo de la red, en metros. El desnivel, d , está expresado en % siendo positivo cuando es ascendente y negativo cuando es descendente. En la aspiración e impulsión el desnivel se ha expresado en metros.

Las necesidades de agua de riego se han determinado a partir de los datos climáticos reales tomados de la estación agroclimática de Santaella, cercana a la ubicación de la finca, de la red de estaciones agroclimáticas de la Junta de Andalucía.

3.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las fincas con una red de riego dividida en varios sectores se plantea la posibilidad de regar de forma simultánea un número variable de sectores. Según los requerimientos de altura manométrica y caudal de cada situación de riego, el tamaño de la bomba y del motor eléctrico pueden cambiar con distintas necesidades de potencia, dando lugar a diferentes tamaños de GFV.

El modelado de la red de distribución, bomba, motor eléctrico y GFV se ha realizado en Matlab. La altura manométrica, H , que debe proporcionar la bomba para suministrar el caudal necesario para los sectores en riego, Q , depende de la presión necesaria para cada sector de riego o su combinación y de la pérdida de carga en las tuberías de aspiración, impulsión, principal y secundaria. Se puede expresar por las ecuaciones (1).

$$\begin{aligned}
 H &= \Delta z + R_f \left[\sum_{i=1}^{i=s} Q_{si} \right]^m + \max(H_{s1}, H_{s2}, \dots, H_{si}) \\
 H_{s1} &= \Delta z_{s1} + R_{fs1} Q_{s1}^m + h_e \\
 H_{s2} &= \Delta z_{s2} + R_{fs2} Q_{s2}^m + h_e \\
 &\vdots \\
 H_{si} &= \Delta z_{si} + R_{fsi} Q_{si}^m + h_e
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Donde Δz es la suma de la altura geométrica de aspiración, de la altura geométrica de impulsión y de la altura geométrica de la tubería principal hasta el distribuidor, en m. Δz_{s1} , Δz_{s2} , ... Δz_{si} son las alturas geométricas totales de cada uno de los sectores $s1$, $s2$, ... si , en

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

m. R_f es el coeficiente de fricción de las tuberías y sus accesorios (codos, válvulas, ...), en m.c.a. $R_{fs1}, R_{fs2}, \dots R_{fsi}$ son las resistencias de fricción de las tuberías que conforman cada sector (secundaria, terciaria y laterales) $s1, s2, \dots si$. $H_{s1}, H_{s2}, \dots H_{si}$ son las alturas manométricas necesarias en las tuberías secundarias que alimentan a los sectores $s1, s2, \dots si$ respectivamente, en m.c.a.

La curva de carga de la red de distribución de agua puede considerarse, para cada situación, que es un segmento vertical, cuyos valores mínimos y máximos corresponden a las alturas manométricas totales mínimas y máximas que debe suministrar la bomba para que los emisores trabajen dentro del margen de presiones que marca el fabricante de estos. El punto de funcionamiento del sistema bomba-red de agua puede ajustarse de forma que la potencia que demanda la bomba sea la potencia generada, salvando las pérdidas en el convertidor de frecuencia y en el motor eléctrico. El punto de trabajo del sistema de bombeo varía a lo largo del día. La velocidad de giro de la bomba se determina aplicando las leyes de semejanza para una misma bomba. La velocidad de giro es proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación del motor. Así las leyes de semejanza se expresan por las ecuaciones (2) para dos puntos de trabajo homólogos. El número 1 corresponde al punto de funcionamiento sobre la curva facilitada por el fabricante de la bomba a velocidad nominal y el punto 2 es punto de operación en las nuevas condiciones de velocidad.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{f_o}{f_n} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{f_o}{f_n}\right)^2 \quad \frac{P_{e2}}{P_{e1}} = \left(\frac{f_o}{f_n}\right)^3 \quad (2)$$

Donde Q_1 y Q_2 es el caudal proporcionado por la bomba en los puntos de operación 1 y 2; H_1 y H_2 es la altura manométrica suministrada por la bomba en los puntos de operación 1 y 2; P_{e1} y P_{e2} es la potencia mecánica en el eje de la bomba en los puntos de operación 1 y 2 y f_o es la frecuencia eléctrica de alimentación al motor de la bomba en el punto de operación 2 producida por el convertidor de frecuencia. y f_n es la frecuencia nominal del sistema eléctrico para el que se conocen las características de la bomba.

3.3 MÉTODO

La valoración del diseño de la red de riego más adecuado para la finca consiste en determinar, para cada uno de los posibles diseños del sistema de riego, el GFV más pequeño que consigue realizar satisfactoriamente el riego de toda la finca [6].

Establecidos los modelos de los diferentes subsistemas que intervienen el proceso es el que se describe a continuación.

Aplicando el modelo de Collares-Pereira y Rabl [8] a los valores medios de irradiación global y difusa diaria sobre el plano horizontal del lugar de ubicación de la finca se obtiene la matriz de recurso solar con 35040 registros de los valores de irradiancia global, directa y difusa en el plano horizontal en intervalos de 15 minutos. La evolución de la temperatura ambiente del lugar se determina a partir de los valores mínimos y máximos de cada día, considerando que lo hace de forma parecida a la radiación solar, aunque con un retraso de dos horas [9], [10]. Los datos de irradiación diarios y temperatura ambiente se obtienen de bases de datos públicas que ofrecen valores medios de una serie amplia de años. Para este trabajo se han obtenido de Atlas de Radiación Solar de la Agencia Andaluza de la Energía [11].

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Con los registros de la matriz de recurso solar se determina la matriz de oferta de potencia del GFV considerando que el punto de funcionamiento es el de máxima potencia del módulo. Se ha seguido el modelo de Green [12] para determinar la potencia generada en cada uno de los instantes de los registros de la matriz de recurso solar. La potencia efectiva generada, P_G , se ha determinado por la ecuación (3)

$$P_G = P_{PV} F_p = N_S N_P V_{mpp} I_{mpp} F_p \quad (3)$$

Donde N_S es el número de módulos fotovoltaicos conectados en serie; N_P es el número de módulos conectados en paralelo; V_{mpp} es la tensión e I_{mpp} es la intensidad en el punto de máxima potencia de funcionamiento del módulo fotovoltaico en las condiciones dadas en cada instante considerado. F_p es el factor de pérdidas del GFV, que incluye las pérdidas debidas a las variaciones espectrales, las pérdidas por dispersión y las pérdidas en el cableado. Se ha considerado constante y de valor 0,86. La cantidad de módulos en serie se ha determinado siguiendo los procedimientos de diseño de la ingeniería fotovoltaica [13], [14]. La cantidad de módulos en paralelo es conocido por cadena o *string*.

En este trabajo se ha considerado que las subunidades de riego de la finca no se modifican en tamaño, aunque se ha contemplado distintos diámetros de tuberías lateral y terciaria para adecuarse a los caudales de los emisores contemplados, en concreto 2,2, 3,5 y 3,8 l/h. Estos cambios han conllevado ajustar los diámetros de las tuberías secundaria, principal, impulsión y aspiración. Se ha considerado una serie de escenarios en los que la altura manométrica y caudal ofrecidos por la bomba pueden abastecer de riego a un máximo de tres sectores, o un máximo de dos sectores o a un solo sector. En la tabla 2 está el resumen de los escenarios contemplados en este estudio. El modelado de la red de riego según las ecuaciones (1) en cada uno de los posibles funcionamientos de la red determina la altura manométrica y el caudal requerido a la bomba, P_h , que, a su vez consume una potencia por su eje y que suministra el motor eléctrico. Con lo que la potencia eléctrica generada para mantener el riego de los sectores en las condiciones dadas se expresa por la ecuación (4)

$$P_G = \frac{P_h}{\eta_{bomba} \eta_{VFD} \eta_{motor}} \quad (4)$$

Donde η_{bomba} es el rendimiento de la bomba en el punto de funcionamiento para cada una de las situaciones consideradas, que es variable y se determina a partir de las curvas características, $H-Q$ y P_e-Q , facilitadas por el fabricante. η_{VFD} es el rendimiento de convertidor de frecuencia variable (VFD), que depende del porcentaje de carga de este y de la frecuencia de operación. η_{motor} es el rendimiento del motor eléctrico que depende de su porcentaje de carga y se determina a partir de los datos de rendimiento facilitados por el fabricante a diferentes regímenes de carga.

Tabla 1. Descripción de los escenarios considerados en este trabajo.

Escenarios	Caudal emisor (l/h)	Diam. tub. Lateral (mm)	Máximo número de sectores en riego	Cantidad de combinaciones de sectores, C	Altura manométrica requerida, H (m.c.a.)	Caudal requerido, Q (m ³ /h)	Bomba (potencia motor)
1	2,2	16	1	4	83,5	32,0	NB 40-250/255 (22 kW)
2	3,5	16	1	4	96,0	50,9	NB 50-315/267 (30 kW)

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Escenarios	Caudal emisor (l/h)	Diam. tub. Lateral (mm)	Máximo número de sectores en riego	Cantidad de combinaciones de sectores, C	Altura manométrica requerida, H (m.c.a.)	Caudal requerido, Q (m ³ /h)	Bomba (potencia motor)
3	2,2	20	1	4	83,0	32,0	NB 40-250/255 (22 kW)
4	3,8	20	1	4	94,8	55,3	NB 50-315/267 (30 kW)
5	2,2	16	2	10	86,8	63,3	NB 50-250/254 (30 kW)
6	3,5	16	2	10	91,9	100,6	NB 65-250/269 (55 kW)
7	2,2	20	2	10	85,2	63,3	NB 50-250/254 (37 kW)
8	3,8	20	2	10	115,7	109,3	NB 65-315/295 (75 kW)
9	2,2	16	3	14	80,3	94,5	NB 50-250/263 (37 kW)
10	3,5	16	3	14	92,2	150,4	NB 65-250/270 (75 kW)
11	2,2	20	3	14	78,7	94,5	NB 50-250/263 (37 kW)
12	3,8	20	3	14	84,8	163,2	NB 65-250/269 (55 kW)

Por otra parte, considerando un riego multisectorial, la cantidad de combinaciones posibles de sectores que están en riego corresponden a la suma de las combinaciones sin repetición tomados en grupos de 1, 2 y 3 sectores (valor n). La ecuación (5) permite determinar la cantidad de combinaciones, C .

$$C = \binom{s}{n} = \frac{s!}{(s-n)!n!} \quad (5)$$

En la que s es el total de sectores en los que se ha dividido la finca y n es la cantidad de sectores que forman cada grupo considerado.

Para cada uno de los escenarios considerados se determina la *matriz de demanda* que contiene los valores de potencia eléctrica generada, P_G , mínima requerida para el riego adecuado de los sectores con riego simultáneo en cada combinación.

El algoritmo desarrollado por Calero et al. en [6], [7] compara los valores de la *matriz de oferta de potencia* en cada uno de los valores discretos de tiempo considerados y los valores de la *matriz de demanda de potencia* requerida para el riego de un sector (el de mayor necesidad de riego), dos sectores (los dos de mayores necesidades de agua), etc. Estos autores incorporan la *Matriz de Trabajo Diaria (MTD)* que contiene datos relevantes para la toma de decisión del sector o sectores con mayores necesidades de riego y que por tanto a esa combinación de sectores se destina la potencia ofertada por el sistema de generación. La *MTD* recoge otros datos del sistema que van variando a lo largo del día, el riego aportado en cada sector y el déficit de agua en el suelo y también, la programación del riego según las necesidades de agua del cultivo; la evapotranspiración del cultivo y la precipitación diaria, a fin de aplicar la ecuación del balance de agua según FAO [15].

4. RESULTADOS

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

De la aplicación de la metodología descrita se obtiene el generador óptimo, formado por el número de strings (N_p) mínimo, de 17 módulos fotovoltaicos en serie de 450 Wp, que consigue el riego satisfactorio de la finca, para cada escenario. (ver figura 2).

Se determina que en los escenarios 9, 11 y 12 el GFV óptimo es de 5 strings (N_p), que corresponde a una potencia de 38,25 kWp. La solución más económica corresponde a los escenarios 9 y 11 en los que la potencia del motor de accionamiento de la bomba es de 37 kW, menor a los requerimientos de los otros escenarios.

Se define la Eficiencia del uso de la Energía, EuE , como la relación entre la energía entregada al sistema de riego y la energía producida por el GFV. Se utiliza para evaluar el funcionamiento energético de los sistemas de riego fotovoltaico directo. Los escenarios 9 y 11 presentan un valor EuE muy parecido, 27,62% y 27,58% respectivamente.

La gráfica de la figura 2 muestra los resultados de las simulaciones de cada escenario, representando la potencia del GFV más pequeño que satisface el riego de la finca. La zona sombreada en verde corresponde a los escenarios óptimos.

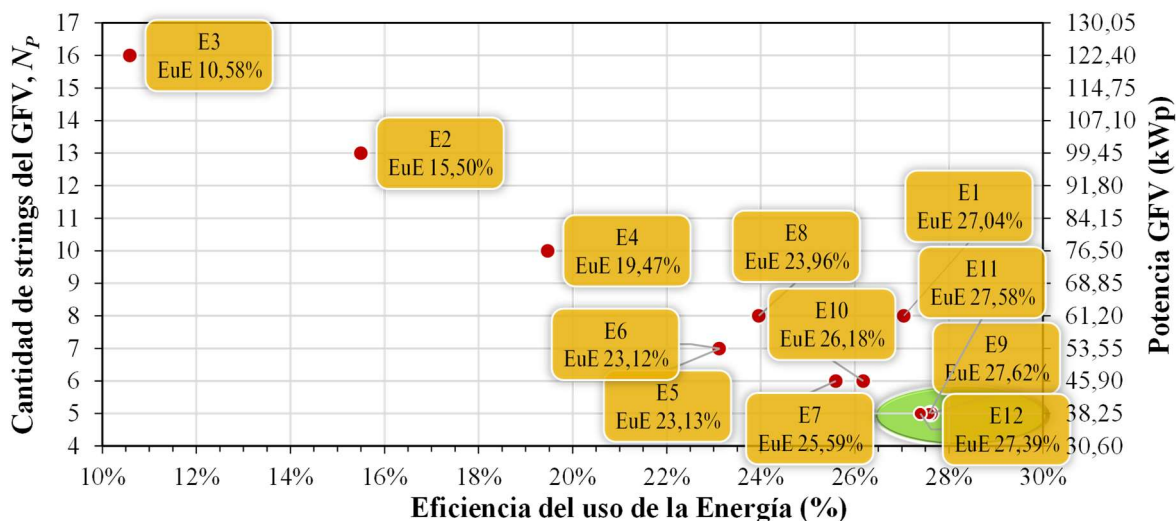


Figura 2. Relación entre los valores de la EuE anual y el tamaño GFV óptimo en cada uno de los escenarios considerados. La zona sombreada en verde corresponde al diseño óptimo.

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se determina que el diseño de la red de riego con emisores compensados de 2,2 l/h en tubería de PE de 16 mm de diámetro, regando hasta tres sectores simultáneamente se requiere una bomba centrífuga de voluta de una etapa de diámetro nominal del impulsor de 250 mm y rodete de 263 mm para 2955 rpm, con motor de 37 kW abastecido con energía fotovoltaica de un GFV de 38,25 kWp.

También que el riego fotovoltaico multisectorial es más eficiente, ya que se puede aprovechar mejor la energía solar al utilizar las horas centrales del día para abastecer de agua a varios sectores simultáneamente.

Por otra parte, se ha visto que hay un ahorro de emisiones de CO₂ de 5,13 toneladas al año, por el no uso de la electricidad de la red de distribución.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Nomenclatura

C	Cantidad de combinaciones de sectores en riego
EuE	Eficiencia del uso de la Energía
f_n	Frecuencia nominal del motor eléctrico de la bomba
f_o	Frecuencia de operación de variador de frecuencia
F_p	Factor de pérdidas de los módulos fotovoltaicos
GFV	Generador Fotovoltaico
H	Altura manométrica de un flujo
h_e	Presión de trabajo del emisor
I_{mpp}	Corriente del módulo fotovoltaico en el punto de máxima potencia
m	Exponente del caudal
MTD	Matriz de Trabajo Diaria
n	Cantidad de sectores que forman cada grupo
N_P	Número de módulos fotovoltaicos o cadenas conectados en paralelo
N_S	Número de módulos fotovoltaicos conectados en serie formando una cadena (string)
P_G	Potencia efectiva generada por los módulos fotovoltaicos. Potencia del GFV
P_h	Potencia hidráulica
P_{PV}	Potencia generada por los módulos fotovoltaicos
Q	Caudal de un flujo (volumétrico)
R_f	Coefficiente de fricción de las tuberías
s	Número de sectores de riego de la finca
VFD	Accionamiento de frecuencia variable
V_{mpp}	Voltaje del módulo fotovoltaico en el punto de máxima potencia
Δz	Incremento o decremento de altura geométrica
η_{bomba}	Rendimiento de la bomba en el punto de funcionamiento
η_{motor}	Rendimiento del motor eléctrico
η_{VFD}	Rendimiento del convertidor de frecuencia

REFERENCIAS

- [1] J. Corominas, “Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad,” *Ing. del agua*, vol. 17, no. 3, pp. 219–233, Sep. 2010, doi: 10.4995/ia.2010.2977.
- [2] S. Senthil Kumar, C. Bibin, K. Akash, K. Aravindan, M. Kishore, and G. Magesh, “Solar powered water pumping systems for irrigation: A comprehensive review on developments and prospects towards a green energy approach,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 33, pp. 303–307, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.092.
- [3] R. Posadillo and R. López Luque, “A sizing method for stand-alone PV installations with variable demand,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1049–1055, May 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.06.003.
- [4] J. Reca-Cardena and R. López-Luque, “Design Principles of Photovoltaic Irrigation Systems,” in *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 1, I. Yahyaoui, Ed. Madrid: Elsevier, 2018, pp. 295–333.
- [5] V. Zavala, R. López-Luque, J. Reca, J. Martínez, and M. T. Lao, “Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- system,” *Appl. Energy*, vol. 260, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114261.
- [6] M. Calero-Lara, R. López-Luque, and F. J. Casares, “Methodological advances in the design of photovoltaic irrigation,” *Agronomy*, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/agronomy11112313.
- [7] M. Calero-Lara, “Metodología de la adaptación de la oferta y demanda de potencia en sistemas de riego a presión constante alimentados con sistemas fotovoltaicos,” Universidad de Córdoba, 2023.
- [8] M. Collares-Pereira and A. Rabl, “The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values,” *Sol. Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 155–164, Jan. 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90100-2.
- [9] E. Lorenzo Pigueiras, *Electricidad solar fotovoltaica. Vol. II. Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos*. Sevilla: Progensa, 2006.
- [10] E. Lorenzo Pigueiras, *Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. Sevilla: Progensa, 1994.
- [11] Agencia Andaluza de la Energía-Consejería de Innovación Ciencia y Empresa, “Radiación solar.” <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php> (accessed Aug. 21, 2019).
- [12] M. A. Green, *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1982.
- [13] V. Mascarós Mateo, *Instalaciones generadoras fotovoltaicas*. Madrid: Ediciones Paraninfo, SA, 2015.
- [14] E. Lorenzo Pigueiras, *Ingeniería fotovoltaica*. Sevilla: PROGENSA, 2014.
- [15] J. Doorenbos and W. O. Pruitt, “Crop Water Requirements,” FAO, Rome, 1977.