

05-027

### **CALCULATION MODEL FOR SOLAR-POWERED DRIP IRRIGATION MANAGEMENT**

Cervera Gascó, Jorge<sup>(1)</sup>; Del Castillo Sanchez-Cañamares, Amaro<sup>(1)</sup>; Montero Martinez, Jesus<sup>(1)</sup>;  
Tarjuelo Martin-Benito, Jose Maria<sup>(1)</sup>; Moreno Hidalgo, Miguel Angel<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>UCLM

The use of solar-powered drip irrigation systems has many advantages, as a result, such systems have become increasingly widespread. However, the incorporation of photovoltaic energy have difficulties in the generation of power, due to the variability of solar radiation over time.

In this study, has been developed a model that allows the integration of the hydraulic and photovoltaic model be able to manage irrigation quality with different subunits, of irregular shape and topography, in which the plot to be irrigated has been divided, and which are supplied directly from an elevated reservoir or from a pump powered by photovoltaic energy.

The model has been generated in Matlab<sup>®</sup> being also useful to detect sizing problems both in the photovoltaic system and in the choice of pump for irrigation.

**Keywords:** *Photovoltaic power; Solar radiation; Hydraulic model; Irrigation quality*

### **MODELO PARA LA GESTIÓN DEL RIEGO POR GOTEO MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTVOLTAICA**

La inclusión de la energía fotovoltaica para el riego por goteo en la agricultura ofrece muchas ventajas, extendiéndose cada vez más. No obstante, la incorporación de la energía fotovoltaica presenta dificultades en la generación de la potencia, debido a la variabilidad de la radiación solar a lo largo del tiempo.

En este trabajo se ha generado un modelo que permite la integración del modelo hidráulico y del modelo fotovoltaico capaz de gestionar la calidad del riego con distintas subunidades, de forma y topografía irregular, en las que se haya dividido la parcela a regar, y que sean abastecidas directamente de un embalse elevado o de una bomba alimentada con energía fotovoltaica.

El modelo ha sido generado en Matlab<sup>®</sup> siendo útil también para la detección de problemas de dimensionamiento tanto en la parte del sistema fotovoltaico como en la parte de la elección de la bomba para el riego.

**Palabras clave:** *Energía fotovoltaica; Radiación solar; Modelo hidráulico; Calidad del riego.*

Correspondencia: Jorge Cervera Gascó; Jorge.Cervera@uclm.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

La energía necesaria para alimentar los sistemas de bombeo genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen directamente al calentamiento global del planeta (Tarjuelo et al., 2015). El uso de sistemas de riego por goteo utilizando la energía solar ofrece multitud de ventajas, tales como el uso eficiente de los recursos de agua y energía en las zonas de riego agrícola por lo que la implementación de estos sistemas es cada vez más extendida (Dursun et al., 2016). No obstante, el óptimo de funcionamiento de un sistema de riego, desde un punto de vista ecológico, solamente se podrá conseguir considerando simultáneamente criterios medioambientales y económicos (Carrillo-Cobo et al., 2014).

El desarrollo de herramientas y modelos, de ayuda en la toma de decisiones para el diseño y el manejo de las instalaciones de riego contribuye al ahorro de agua y energía, tanto en instalaciones nuevas como en las que están en funcionamiento. Así, Carrion et al. (2013 y 2014) desarrollaron la herramienta PRESUD para el diseño óptimo de subunidades regulares de riego a presión, tanto localizado como por aspersión, buscando el coste total mínimo (operación más inversión) por unidad de superficie regada, teniendo en cuenta la uniformidad de emisión y la eficiencia de aplicación en las subunidades de riego. A su vez, Moreno et al. (2016) desarrollaron la herramienta PRESUD-irregular, que permite el diseño de mínimo coste total de subunidades de riego a presión en parcela con forma y topografía irregulares. Carrion et al (2016) desarrollaron una herramienta llamada DOPIR (Dimensioning Of Pressurized IRrigation) para la optimización del proceso de extracción y aplicación del agua con el sistema de riego, buscando el coste total mínimo (inversión más operación), contemplando el proceso en su conjunto, desde la fuente de agua hasta el emisor. En todas estas herramientas, la fuente de energía considerada es la energía eléctrica procedente de fuentes convencionales y grupos electrógenos. El hecho de incorporar energía fotovoltaica en estos modelos supone un reto por la gran variabilidad en la generación de potencia derivada de la variabilidad de la radiación solar a lo largo del tiempo.

## 2. Objetivos

Así, el objetivo del trabajo es desarrollar una herramienta que permita la integración de un modelo hidráulico y fotovoltaico para analizar la calidad del riego en las distintas subunidades de forma y topografía muy irregular en que se haya dividido la parcela a regar, que se alimentan directamente de un depósito elevado o de una bomba alimentada con energía fotovoltaica.

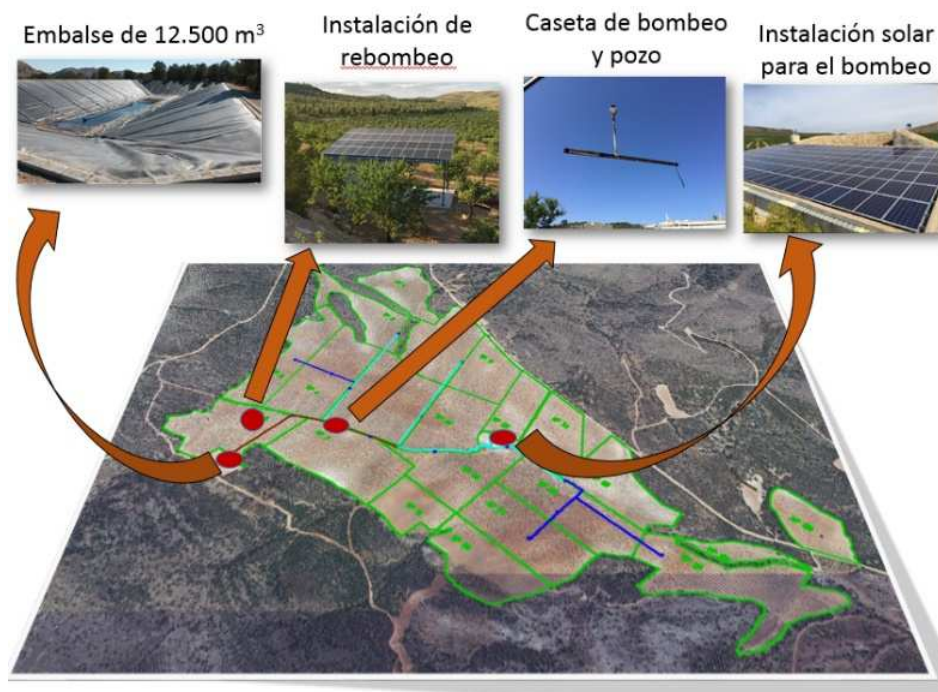
## 3. Metodología

Para la realización, calibración y validación de este modelo se ha utilizado una parcela de 90 ha de almendros, con marco de 7 x 7 m<sup>2</sup> regada por goteo. La finca está situada en el término municipal de Hellín, al sureste de la provincia de Albacete, y está dividida en 20 subunidades, que están ubicadas en una topografía muy irregular, con grandes diferencias de pendiente incluso dentro de la misma subunidad.

Los goteros utilizados son autocompensantes, con un caudal de diseño de 2 l/h, habiéndolos ensayado en laboratorio para obtener su curva de descarga y el coeficiente de variación de fabricación. El agua suministrada a la plantación procede de un sondeo con nivel dinámico situado a 180 m, utilizando una bomba sumergida de 26 kW alimentada con energía fotovoltaica. Además, la finca cuenta con un embalse de 12.500 m<sup>3</sup> aproximadamente.

En la figura 1 se muestra el plano con las subunidades, la red de distribución, ubicación de los paneles solares, pozo y embalse.

**Figura 1. Plano de la finca con las subunidades, la red de distribución, ubicación de los paneles solares, pozo y embalse.**



En la cubierta de la caseta, que se encuentra en la parte central de la finca, están instalados 152 paneles fotovoltaicos, con una disposición de 8 ramales en paralelo con 19 paneles por ramal que aportan una potencia máxima de 40 kW, siendo la potencia unitaria por panel de 265 W, con la que se alimenta la bomba a través de un variador de velocidad de 30 kW. El cableado está dividido en dos tramos: el primero va de los módulos al variador, con 1 m longitud y una sección de 150 mm<sup>2</sup>, y el segundo tramo va del variador a la bomba, con una longitud 450 m y una sección también de 150 mm<sup>2</sup>, todos ellos de aluminio.

Además, la finca cuenta con un sistema de re-bombeo solar que permite extraer agua del embalse y realizar la re-impulsión al sistema de riego directo por goteo.

Los datos de entrada de irradiación (W/m<sup>2</sup>), temperatura ambiente (°C) y velocidad del viento (m/s) han sido obtenidos de un piranómetro (Middleton) y de una estación meteorológica (WS-600) respectivamente instalados junto a los paneles fotovoltaicos permitiendo obtener datos muy fiables y representativos. La adquisición de estos datos permite simular potencias en tiempo real disponibles a la entrada de la bomba.

Con el fin de tener una precisa caracterización de la finca, se ha realizado un levantamiento topográfico con GPS-RTK, y precisión centimétrica en altimetría, identificando además el inicio y fin de cada ramal, y la localización de cada una de las válvulas de apertura de las subunidades, consiguiendo así una muy buena caracterización del sistema de riego instalado. En la figura 2 se muestra una ortoimagen con todos los puntos obtenidos con GPS-RTK.

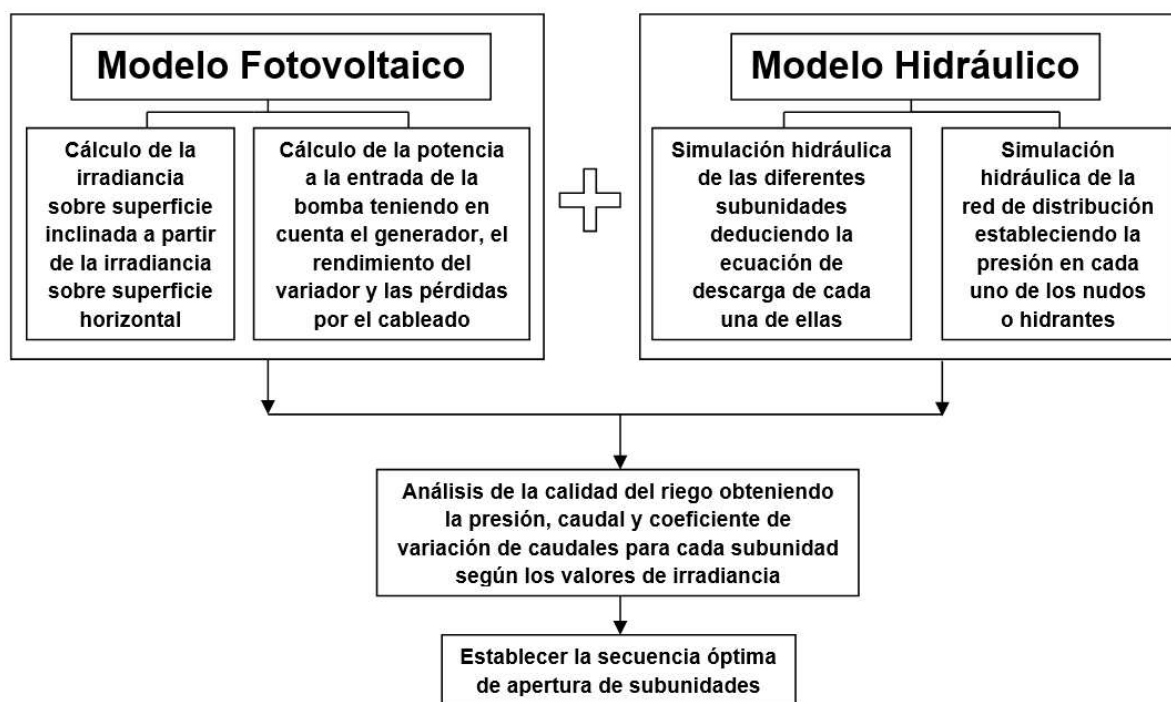
**Figura 2. Medición de puntos de inicio y final de ramal así como de las válvulas de apertura de cada subunidad mediante GPS-RTK.**



Además, se han realizado diferentes vuelos mediante vehículos aéreos no tripulados (drones) utilizando un drone de tipo cuadricóptero md-400 con el fin de obtener el modelo digital del terreno (MDT), lo que ha permitido determinar la cota de cada uno de los goteros con precisión centimétrica ( $< 7$  cm).

La herramienta generada está compuesta por la integración de dos submodelos, uno fotovoltaico y otro hidráulico. Posteriormente estos dos modelos se han unificado creando un único modelo denominado PRESUD-Solar. En la figura 3 se muestra el diagrama de flujo seguido para el desarrollo de la herramienta generada.

**Figura 3. Diagrama de flujo seguido para el desarrollo de la herramienta generada.**



A continuación se desarrolla la metodología utilizada en ambos modelos.

### 3.1 Modelo Hidráulico

La información obtenida ha permitido reproducir el diseño hidráulico de la red de distribución y de las distintas subunidades de riego. Para la obtención del modelo hidráulico de la

instalación se ha utilizado el motor de cálculo EPANET (Rossman, 2000), implementado en un software propio desarrollado en Matlab®.

La descarga de los goteros se ha estimado con la ecuación (Karmeli y Keller, 1975), obtenida en laboratorio:

$$qh = K \cdot h_e^x \quad (1)$$

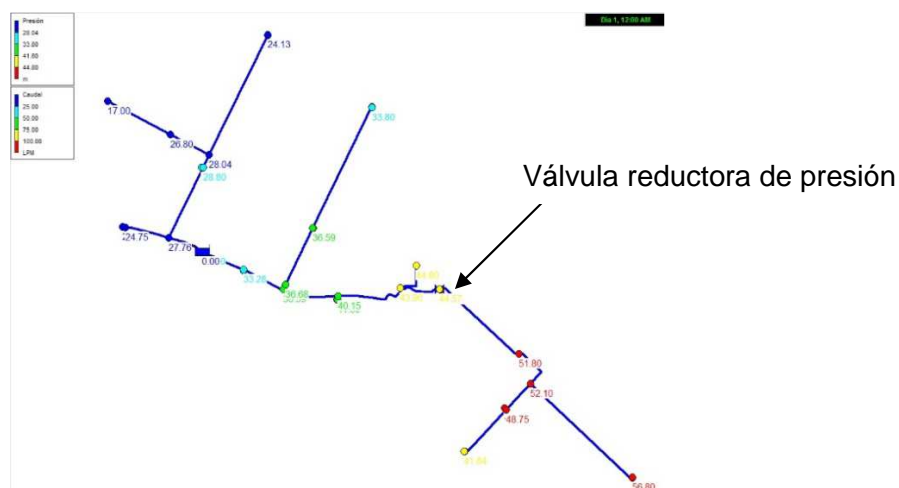
Siendo qh el caudal del emisor, K el coeficiente del emisor, x el exponente del emisor y he la presión en cabecera del emisor.

Con ayuda de la herramienta PRESUD-irregular se ha deducido la ecuación de descarga de cada subunidad, que determina el caudal descargado por el conjunto de goteros en función de la presión a la entrada de la subunidad, así como la presión y caudal descargado por cada uno de los goteros. Esto permite calcular los correspondientes coeficientes de uniformidad de emisión, y los coeficientes de variación de caudal y presión en cada una de las subunidades, teniendo una muy buena caracterización de la calidad del riego.

La simulación hidráulica de la red de distribución (figura 4) permite establecer la presión en cada uno de los nudos o hidrantes a partir de la presión y caudal en cabecera. El modelo hidráulico de la red y de las subunidades de riego permite identificar las subunidades que podían ser regadas adecuadamente desde el embalse, situado en la parte más alta de la finca, así como establecer el valor de presión adicional que sería necesario tener en el origen de la red para obtener un mínimo valor de uniformidad de emisión en cada subunidad de riego.

Además, esto permitió determinar el punto exacto para la instalación de una válvula reductora de presión (50 mca) con el fin de proteger la zona más baja de la finca del exceso de presión suministrado para aquellas subunidades que así lo requieren y evitar superar la presión soportada por la tubería de la red de distribución (60 mca).

**Figura 4. Simulación de la red de distribución con presión en cada uno de los nudos.**



Para la calibración y validación del modelo hidráulico se han tomado medidas de presión en puntos estratégicos de la red y de las subunidades de riego, realizando los ajustes con los valores de rugosidad para obtener una pérdida de carga equivalente a la real, lo que permite tener en cuenta de forma indirecta las singularidades del conjunto de la instalación. Además, en la caseta del pozo se encuentra instalado un transductor de presión y un contador con el

fin de obtener las presiones y caudales de salida de la bomba que junto a datos horarios de nivel dinámico obtenidos mediante un sistema compuesto por un compresor y una electroválvula accionada por un dataloger, permite caracterizar de forma precisa la extracción que se produce en el pozo.

### 3.2 Modelo Fotovoltaico

#### 3.2.1 Conversión de la irradiancia solar sobre superficie inclinada.

La irradiancia solar sobre superficie inclinada (GTI) debe ser obtenida mediante la irradiancia solar sobre superficie horizontal (GHI) obtenida mediante el piranómetro (expresada en  $W \cdot m^{-2}$ ) instalado en la cubierta de la caseta teniendo en cuenta que, la inclinación de los paneles fotovoltaicos es de  $8,5^\circ$ , medidos con un GPS-RTK, y orientación  $0^\circ$  Sur. Para ello se ha utilizado un modelo de conversión de irradiancias desarrollado por R.Perez et.al (1992) que permite obtener la irradiancia directa sobre plano horizontal (DHI). La irradiancia difusa sobre plano horizontal (DHI) es posible obtenerla mediante la siguiente expresión, ya que los otros valores son conocidos.

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(\theta_z) \quad (2)$$

Finalizado el cálculo de las componentes de irradiancia horizontales podemos calcular las componentes de irradiancia inclinadas. El proceso de conversión de irradiancia directa sobre superficie inclinada se basa en un planteamiento geométrico, el cual depende de los ángulos de inclinación y orientación de la superficie y las coordenadas solares.

Para la conversión de irradiancia difusa sobre superficie inclinada se ha utilizado el modelo propuesto por Pérez et al (1990) siendo uno de los modelos más utilizados para la estimación como descripción más detallada del comportamiento anisotrópico de la irradiancia difusa.

Otra componente que hay que tener en cuenta en el cálculo total de la irradiancia es la irradiancia reflejada sobre superficie inclinada, produciéndose el fenómeno de reflexión con el suelo e incidiendo en la superficie inclinada.

La suma de todas las componentes de irradiancia sobre superficie horizontal proporciona el valor de irradiancia total sobre superficie inclinada.

#### 3.2.2 Cálculo de la potencia máxima del generador según el nivel de irradiación.

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos normalmente proporcionan los parámetros eléctricos que operan en una misma condición. Por tanto, para describir el comportamiento de forma precisa del generador fotovoltaico según la variabilidad de las condiciones ambientales (De Soto et al., 2006) se ha utilizado la siguiente expresión.

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

Para la determinación de la curva de Intensidad –Tensión (I-V) se han utilizado los valores proporcionados por el fabricante, que indican las características de los paneles fotovoltaicos. Además, se ha tenido en cuenta la velocidad del viento para el cálculo de la temperatura de trabajo de la célula, siendo este último un parámetro muy importante para el rendimiento global de la instalación.

Otro aspecto importante tenido en cuenta es la degradación de los paneles fotovoltaicos que ha sido calculada en función del año de vida útil que estos presentan en el momento del

estudio aplicándose para la obtención de la producción energética final de la instalación fotovoltaica.

### **3.2.3 Cálculo de la potencia del Variador.**

Para el cálculo de la eficiencia del variador se ha utilizado una expresión polinomial generada con datos proporcionados por un analizador de corriente continua instalado a la entrada del variador y por un analizador de redes instalado a la salida del variador permitiendo caracterizar de forma muy precisa el modelo fotovoltaico generado.

### **3.2.4 Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado.**

Para el cálculo de las pérdidas de potencia en el cableado se distinguen dos tramos según sea en corriente continua (Paneles fotovoltaicos - Variador) o en corriente alterna trifásica (Variador – Bomba). Su cálculo general se basa en el criterio de la resistencia del conductor empleando además la intensidad máxima circulante por el conductor y el número de conductores.

### **3.2.5 Cálculo de la potencia de entrada de la bomba.**

Con todas las fases calculadas obtenemos finalmente la potencia disponible a la entrada de la bomba que será capaz de suministrar al sistema de riego.

Del mismo modo que con el modelo hidráulico, el modelo fotovoltaico se ha implementado en software propio desarrollado en Matlab® integrándose ambos modelos y generando una herramienta que permita analizar y optimizar todo el proceso de bombeo solar.

## **4. Resultados**

Algunos ejemplos sobre aplicación en bombeo solar se pueden ver en los artículos de Reca et.al (2016), López-Luque et al (2015) y Mérida et al (2018). Sin embargo, los modelos simplificados descritos en estas publicaciones pueden conllevar sobreestimaciones en las potencias disponibles a la salida del generador fotovoltaico con consecuencias negativas sobre la gestión de los sistemas de riego. Así, en este estudio se presenta una nueva metodología que permite obtener potencias generadas en tiempo real con un modelo solar preciso que tiene en cuenta todas las fases que influyen en su cálculo teniendo en consideración parámetros eléctricos y resistivos de los módulos fotovoltaicos. En cuanto a la demanda de potencia por parte del sistema de riego, la precisión del modelo hidráulico tiene en cuenta la variación del nivel dinámico en tiempo real ofreciendo una mejor respuesta al modelado de las subunidades, a nivel de gotero, y la red de distribución, a nivel de hidrante.

Además, la herramienta generada permite realizar combinaciones entre 2 y 3 subunidades según los valores de radiación seleccionando aquellas que presenten un mejor comportamiento.

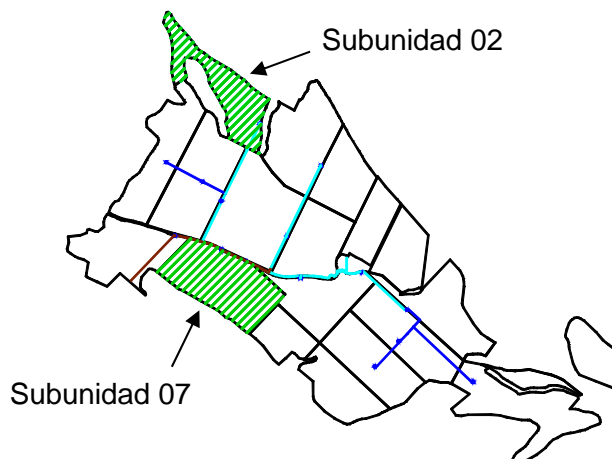
En este caso, los valores obtenidos con la herramienta generada ofrecen una muy buena aproximación frente a los valores que han sido medidos con los equipos instalados en un proceso de validación de la herramienta, tanto en la parte de la instalación fotovoltaica como en la parte de la instalación hidráulica.

A modo de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos con la herramienta generada para la combinación de dos subunidades diferentes, ya que las características de la bomba permiten el riego de dos subunidades simultáneamente, realizando el riego directo desde una bomba alimentada con energía fotovoltaica.

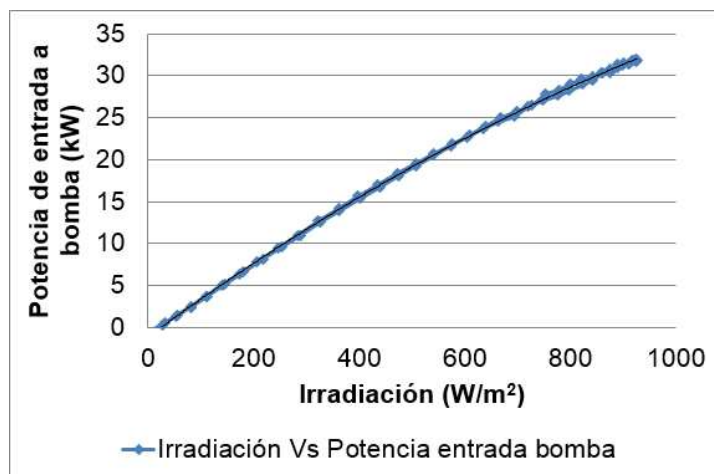


En la figura 5 se puede ver la posición que ocupan las subunidades 02-07 en el plano de la finca. En la figura 6 se puede ver la simulación realizada mediante el modelo fotovoltaico, obteniéndose valores de potencia real (cada 10 min) en función de la irradiancia horizontal registrada el día 16-09-2016.

**Figura 5. Posición de las subunidades de riego.**



**Figura 6. Simulación de irradiancia Vs potencia de entrada a la bomba.**

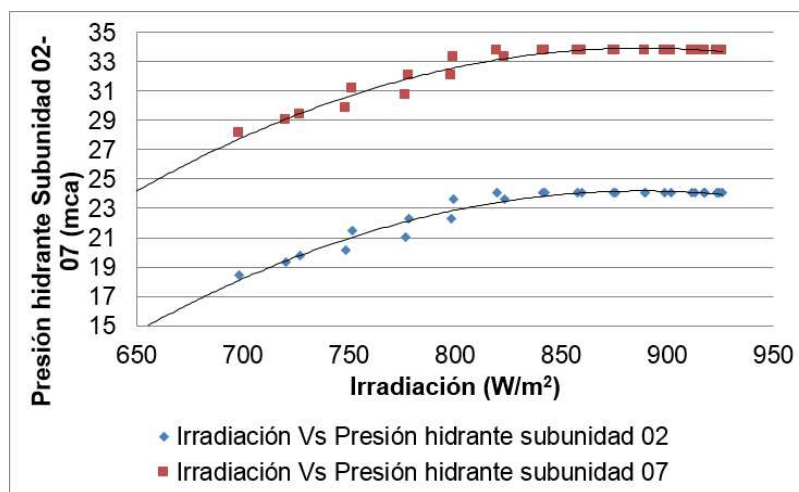


En las figuras 7, 8 y 9 se representan la simulación para la combinación de las subunidades 02-07, representándose la relación existente entre la potencia a la entrada de la bomba y la presión, caudal, y coeficiente de variación de caudales obtenidos para cada subunidad, respectivamente.

En la figura 6 se puede ver que se trata de un día despejado y soleado, ya que conforme la irradiancia aumenta también lo hace la potencia disponible a la entrada de la bomba.



Figura 7. Simulación de irradiación Vs Presión en hidrante para las subunidades 02 y 07.

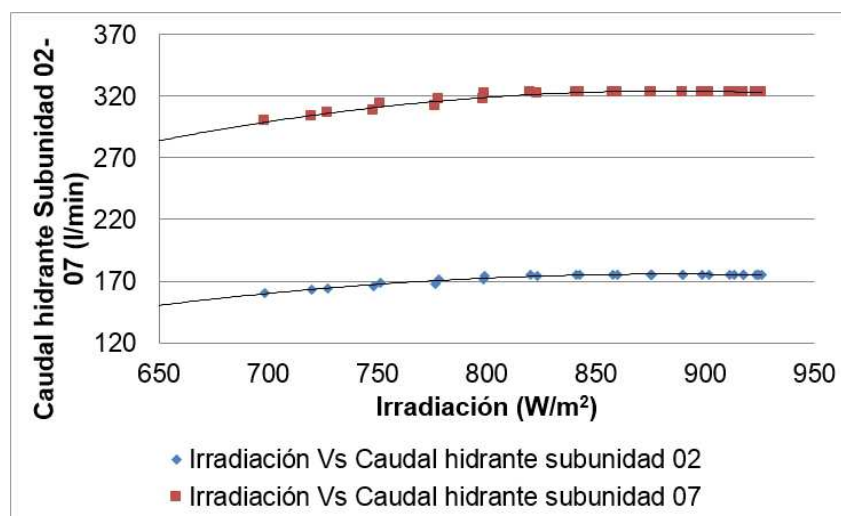


En la figura 7 se comprueba como la presión en el hidrante de la subunidad 07 es mayor que la presión en el hidrante de la subunidad 02. Esto es debido a que la subunidad 07 tiene una posición geográfica más favorable así como una distancia más corta con respecto a la posición de la bomba que minimiza las pérdidas de carga por las tuberías. La máxima presión se alcanza con irradiancias muy altas y en consecuencia a potencias muy elevadas.

No obstante, se ha observado que la presión alcanzada en ambas subunidades no compromete la presión que soportan las tuberías, por lo que es una buena combinación de subunidades. En la gráfica del ajuste, se observa un mejor comportamiento de la presión a igualdad de irradiación por la mañana que por la tarde debido posiblemente al efecto de la temperatura de trabajo alcanzada por el generador fotovoltaico que disminuye el rendimiento global del sistema.

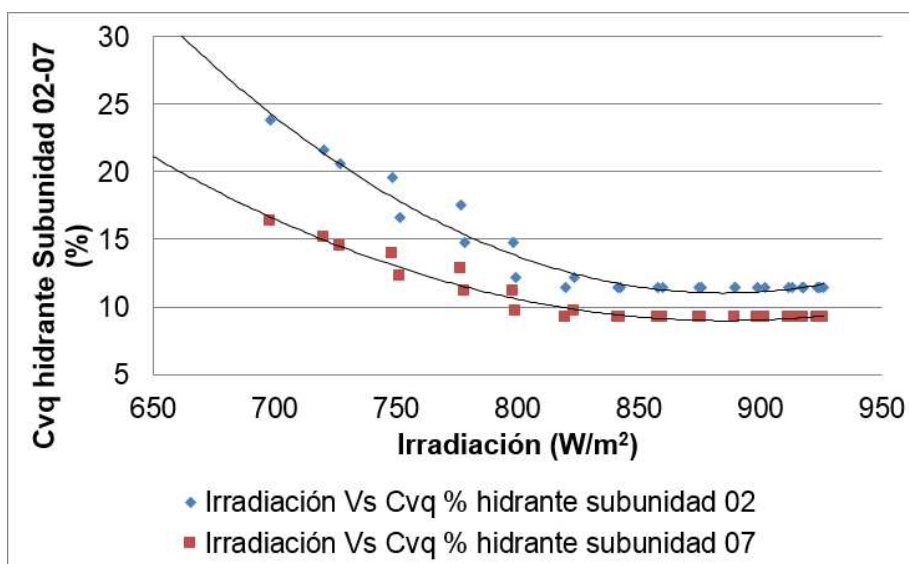
Además, se puede observar que llegado a una irradiación dada la presión se mantiene constante, aunque la irradiación aumente. Esto es debido a que el motor de la bomba ha llegado a su límite de entrega de potencia, por lo que nos puede indicar que el generador fotovoltaico ha sido sobredimensionado, aportando más potencia de la necesaria cuando la irradiación es máxima, en un día despejado.

Figura 8. Simulación de la relación irradiación Vs Caudal en hidrante para las subunidades 02 y 07.



En la figura 8 se comprueba como el caudal en el hidrante de la subunidad 07 es mayor que el caudal en el de la subunidad 02. Esto es debido al mayor tamaño de la subunidad 07 alcanzándose el máximo caudal con irradiancias muy altas y en consecuencia a potencias muy elevadas. No obstante, la suma de caudales máximos de las subunidades se encuentra próxima al caudal nominal de la bomba con buen rendimiento, siendo adecuada la combinación de las dos subunidades.

**Figura 9. Simulación de irradiación Vs Cvq (%) en el hidrante de las subunidades 02 y 07.**



En la figura 9 se puede ver que el Cvq (Coeficiente de variación de caudales %) en la subunidad 02 es mayor que el Cvq que el de la subunidad 07. A pesar de que la subunidad 07 tiene una demanda mayor de presiones y caudales, a igualdad de irradiación y, en consecuencia, de potencia, la distribución de caudales es mejor que en la subunidad 02 y, por tanto, la uniformidad de emisión y la calidad del riego también serán mejores.

En este ejemplo se comprueba que para poder realizar el riego de ambas subunidades simultáneamente es necesario hacerlo con valores de irradiación muy elevados correspondiéndose con las horas centrales del día.

## 5. Conclusiones

La elaboración de una herramienta integral como la desarrollada permite cuantificar la potencia generada por un sistema fotovoltaico en condiciones meteorológicas variables para alcanzar los requisitos de caudal, presión, uniformidad de emisión y coeficiente de variación de caudales, entre otros, requeridos en cada subunidad lo que permite cuantificar la calidad del riego, además de ayudar a establecer la secuencia óptima de apertura de subunidades de acuerdo a la presión disponible en cabecera de la red de distribución y de los hidrantes de las diferentes subunidades. Lo dicho anteriormente, ha permitido determinar el punto exacto para la colocación de una válvula reductora de presión en la red con el fin de proteger la zona baja de la finca de sobrepresiones.

Además, esta herramienta nos va a permitir detectar si la instalación ha sido sobredimensionada tanto en la parte del sistema fotovoltaico como en la parte de la elección de la bomba para el riego.

## Referencias

- Carrillo-Cobo, M.T., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., Rodríguez Díaz, J.A. (2014). Assessing the potential of solar energy in pressurized irrigation networks. The case of Bembézar MI irrigation district (Spain). *Span. J. Agric. Res.* 12 (3), 838–849.
- Carrión, F., Montero, J., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A. (2014). Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain. *Water Resour. Manag.* 28, 5073–5089.
- Carrión, F., Sanchez-Vizcaino, J., Corcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A. (2016). Optimization of groundwater abstraction system and distribution pipe in pressurized irrigation systems for minimum cost. *Irrig Sci.*, 34, 145–159.
- Carrión, F., Tarjuelo, J.M., Hernández, D., Moreno, M.A. (2013). Design of microirrigation subunit of minimum cost with proper operation. *Irrig. Sci.*, 31(5), 1199-1211.
- Dursun, M., Özden., S. (2016). Optimization of soil moisture sensor placement for a PV-powered drip irrigation system using a genetic algorithm and artificial neural network. *Electr Eng*, DOI 10.1007/s00202-016-0436-8
- Jantsch, M., Schmidt, H., Schmid, J. (1992). Results on the concerted action on power conditioning and control, 11th European photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, pp. 1589-1592.
- J.Reca. C.Torrente. R.López-Luque. J.Martínez, Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation Mediterranean greenhouses *Renewable Energy* 85 (2016) 1143-1154.
- Karmeli, D., Keller, J. (1975). Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, 133p.
- A. Mérida García, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, J.A. Rodríguez Díaz. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *Journal of Cleaner Production* 175 (2018) 670–682.
- Moreno M.A., Del Castillo A., Montero J., Tarjuelo J.M., Ballesteros R. (2016). Design optimization of irregular pressurized irrigation subunits. *Biosyst. Eng.*
- R.López-Luque. J.Reca. J. Martínez. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards *Applied Energy* 149 (2015) 13–23.
- Rossman, L.A. (2000). EPANET 2, users' manual, Water supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44 (5), 271–289.
- Perez, R., Ineichen, E. Maxwell, R. Seals and A. Zelenka, (1992). "Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models". *ASHRAE Transactions-Research Series*, pp. 354-369.

Tarjuelo, J.M., Rodriguez-Diaz, J.M., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., Moreno, M.A. (2015). Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. *Agricultural Water Management*, 162 (2015) 67–77.

W. De Soto et al., "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", *Solar Energy*, vol 80, pp. 78-88, 2006.