



Integración de modelos hidráulicos y fotovoltaicos en bombeo solar

J. Cervera ¹, A. Del Castillo ², J. Montero ¹, J.M. Tarjuelo ¹, M.A. Moreno ¹

- ¹ Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete;
Jorge.Cervera@uclm.es; Jesus.Montero@uclm.es; Jose.Tarjuelo@uclm.es;
MiguelAngel.Moreno@uclm.es
- ² Instituto de Desarrollo Regional (IDR), UCLM, Paseo de los Estudiantes, s/n, 02006 Albacete;
Amaro.Castillo@uclm.es

Resumen: Uno de los aspectos clave que condicionan el buen funcionamiento de los sistemas de bombeo solar es la gestión que se hace de ellos. Esta gestión debe englobar tanto a la instalación fotovoltaica, siendo capaz de transformar la gran variabilidad de la radiación solar en potencia útil disponible, como a la instalación hidráulica, para poder conseguir una adecuada gestión de riego en cuanto a uniformidad y dosis a aplicar. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta de análisis inteligente de bombes solares, tanto en sistemas de inyección directa como en almacenamiento a embalse, compuesta por un modelo fotovoltaico de alta precisión que permita obtener la potencia generada en tiempo real, integrado con un modelo hidráulico, para poder reproducir el comportamiento del sistema de riego frente a las posibles variaciones de presión y caudal descargado según la potencia eléctrica disponible.

Palabras clave: riego, energías renovables, gestión, optimización.

1. Introducción

Los principales aspectos que deben ser considerados en el proceso de diseño y gestión de un sistema de riego son: maximizar la uniformidad y obtener el mínimo coste total del sistema y determinar los requerimientos del sistema control y telemetría.

Daccache et al. [1] implementaron algoritmos para analizar la relación entre la uniformidad del riego y la presión en el hidrante. Carrión et al. [2, 3] desarrollaron una herramienta de ayuda en la toma de decisiones (ATD) llamada PRESUD, para el diseño y dimensionamiento óptimo de sistemas fijos de aspersión y de riego localizado con coste total mínimo (inversión + operación) por unidad de superficie regada teniendo en cuenta el tipo y tamaño de la bomba junto con el sistema de riego. El uso de estas herramientas hace que sea posible determinar con precisión la uniformidad del sistema, que está directamente relacionado con el rendimiento de los cultivos y, por lo tanto, con el uso eficiente del agua. También es importante para poder determinar el efecto de la presión de trabajo de los emisores en el adecuado equilibrio entre el consumo de energía y el coste total de la aplicación de agua.

En el sector agrícola, la aplicación de las energías renovables es cada vez más frecuente, como la energía solar en sistemas de bombeo para el suministro del agua de riego. En estos momentos se necesita realizar un análisis completo de la aplicabilidad de la energía fotovoltaica en cada país, que está muy influenciada por la estructura y condicionantes de las redes de distribución de energía, junto con la estacionalidad de la demanda de energía del regadío.

Así, el objetivo del trabajo es desarrollar una herramienta inteligente que permita la integración de un modelo hidráulico y fotovoltaico preciso para analizar la calidad del riego en las distintas subunidades en que esté dividido el sistema, con cualquier forma y topografía irregular, estableciendo la secuencia óptima de apertura de subunidades que garanticen una buena gestión de la uniformidad y dosis de riego, tanto para el caso de inyección directa a red como con la utilización de un depósito de regulación y almacenamiento intermedio, utilizando energía fotovoltaica.

2. Materiales y métodos

Para la realización, calibración y validación de estos modelos se ha utilizado una parcela comercial de 90 ha de almendros regada por goteo con sistema de bombeo solar. La finca está situada en el término municipal de Hellín (Albacete) y está dividida en 20 subunidades, que están ubicadas en una topografía y forma muy irregular.

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 30 kW alimentada con energía fotovoltaica. Además, la finca cuenta con un embalse de 12.500 m³.

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

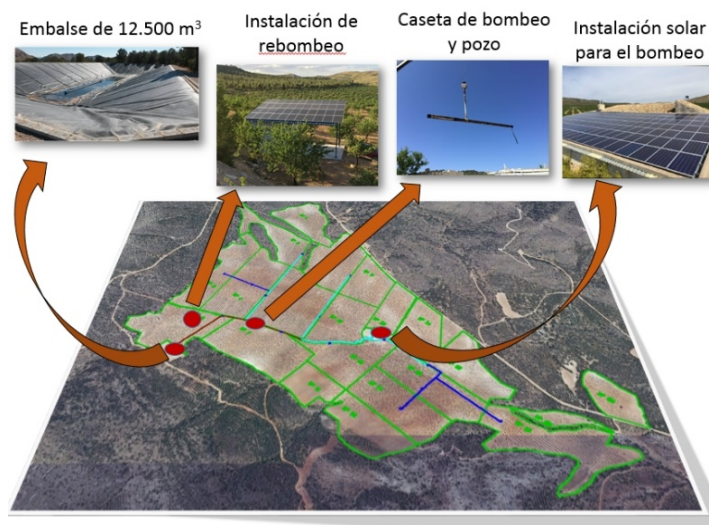


Figura 1. Plano de la finca con las subunidades, la red de distribución, ubicación de los paneles solares, pozo y embalse.

En la cubierta de una nave, que se encuentra en la parte central de la finca, están instalados 152 módulos fotovoltaicos, con una disposición de 8 ramales en paralelo con 19 módulos fotovoltaicos por ramal que aportan una potencia máxima de 40 kW, siendo la potencia unitaria por módulo fotovoltaico 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 cuatro tramos: el primero de ellos es de corriente continua y recorre todos los módulos fotovoltaicos. El segundo de ellos, también en corriente continua, va desde los módulos fotovoltaicos al variador, con 2 m longitud y una sección de 150 mm², siendo ambos de cobre. El tercer tramo, en corriente alterna, va del variador a la bomba, con una longitud 450 m y una sección de 150 mm² y el cuarto tramo, también en corriente alterna, está comprendido desde la entrada del pozo hasta el motor

sumergido con una longitud de 225 m y una sección de 25 mm², Siendo estos últimos de aluminio.

La instalación permite tanto el bombeo directo desde el sondeo a las subunidades de riego como la elevación desde el sondeo a la balsa de regulación y almacenamiento situada 28 m por encima de la cota de salida del sondeo. Desde la balsa se puede regar por gravedad cerca del 60% de las subunidades de riego, existiendo un sistema de re-bombeo solar adicional para el riego del resto de subunidades de riego por goteo.

Los datos de entrada de irradiación (W/m²), 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 módulos 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. A continuación, se desarrolla la metodología utilizada en ambos modelos.

2.1. Modelo Hidráulico

La información obtenida ha permitido reproducir el diseño hidráulico de la red de distribución y de las distintas subunidades de riego mediante un programa de dibujo y diseño asistido por ordenador (CAD) permitiendo trazar los límites de la subunidad, así como su punto de alimentación y todas las tuberías que la conforman. Posteriormente, para la obtención modelo hidráulico de la instalación se ha utilizado el motor de cálculo EPANET [4], implementado en un software propio desarrollado en Matlab®.

La descarga de los goteros se ha estimado con la ecuación de Karmeli y Keller [5], obtenida en laboratorio:

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

Siendo q_h el caudal del emisor, K el coeficiente del emisor, x el exponente de descarga del emisor y h_e 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.

Para la caracterización del funcionamiento del sondeo se ha realizado una evaluación para obtener datos de niveles dinámicos y caudales en función de potencias disponibles en la bomba. Además, la herramienta permite conocer la evolución de las curvas características de la bomba utilizando las leyes de semejanza.

La simulación hidráulica de la red de distribución, figura 3 (a), permite establecer la presión en cada uno de los nudos o hidrantes a partir de la presión y caudal en cabecera. En la figura 3 (b) se puede ver la curva de la bomba y la curva de la instalación calculadas en tiempo real junto a su punto óptimo de funcionamiento. 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.

Toda esta información permitió determinar el punto exacto para la instalación de una válvula reductora de presión a 50 mca con el fin de proteger la zona más baja de la finca del exceso de presión generado para el riego de otras subunidades que así lo requieren y evitar superar la presión soportada por la tubería de la red de distribución de 60 mca.

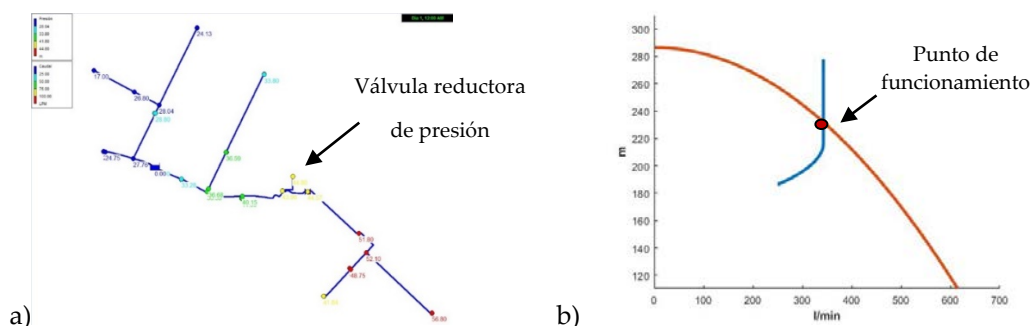


Figura 3. (a) Simulación de la red de distribución con presión en cada uno de los nudos y (b) curva de de bomba y de la instalacion junto a punto de funcionamiento óptimo.

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 caudalímetro con el fin de obtener las presiones y caudales de salida de la bomba que, junto a los 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 evolución del nivel dinámico y el caudal bombeado a lo largo del tiempo.

2.2. Modelo Fotovoltaico

2.2.1. Conversión de la irradiancia solar sobre superficie inclinada.

La irradiancia solar sobre superficie inclinada (GTI) se obtiene mediante la irradiancia solar sobre superficie horizontal (GHI) medida con un piranómetro (expresada en W·m⁻²) instalado en la cubierta de la caseta teniendo en cuenta que, la inclinación de los paneles fotovoltaicos es de 8,5°, medidos con un GPS-RTK, y orientación 0° Sur. Para ello se ha utilizado un modelo de conversión de irradiancias desarrollado por Perez et.al [6] 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 [7] 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.

2.2.2. 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 [8] se ha utilizado la siguiente expresión.

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

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 módulos 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.

Normalmente, las instalaciones fotovoltaicas se encuentran sobredimensionadas por diversas razones. Es por ello, que la herramienta incorpora un algoritmo de control de la potencia generada mediante la selección del punto de funcionamiento en condiciones de máxima potencia.

2.2.3. 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 Chauvin Arnoux modelo PEL 103 instalado a la entrada del variador y por un analizador de redes AR5 (CIRCUTOR) instalado a la salida del variador permitiendo caracterizar de forma muy precisa el modelo fotovoltaico generado.

2.2.4. 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 (Módulos 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.

2.2.5. 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.

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.

3. Resultados y discusión

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 directo desde la bomba de dos subunidades simultáneamente.

La herramienta establece limitaciones de presión tanto en las tuberías de distribución (60 mca), como en los goteros de las subunidades (35 mca) con el fin de no superar la presión de trabajo en estos elementos. Además, con el fin de obtener riegos eficientes y de calidad se ha establecido un tiempo mínimo de riego, en este caso de una hora, de modo que la herramienta selecciona solamente aquellas combinaciones que cumplen este requisito.

Si alguna de las combinaciones no cumple las condiciones anteriormente mencionadas, automáticamente es descartada para el riego.

El número de combinaciones realizadas con dos subunidades diferentes es de 190 generándose una matriz de resultados con respecto al periodo en tiempo real de riego escogido.

Con el fin de tener una mejor comprensión de la herramienta generada se establecen dos vías de análisis de resultados. En la primera de ellas, la herramienta permite analizar cualquier periodo de tiempo (anual, mensual, diario, etc.), sin embargo, a modo de ejemplo se ha seleccionado un instante dado correspondiente al día 03-05-2017 a las doce del mediodía alcanzando una potencia máxima del generador fotovoltaico de 27,98 kW, tal y como se puede ver en la figura 4.

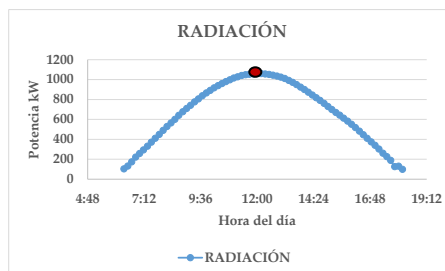


Figura 4. Curva de radiacion Solar para el día 03-05-2017.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

Tabla 1. Tabla de posibles combinaciones de subunidades para el día 03-05-2017 a las 12 del mediodía.

	Combinaciones de Subunidades																			
	Sub 1	Sub 2	Sub 3	Sub 4	Sub 5	Sub 6	Sub 7	Sub 8	Sub 9	Sub 10	Sub 11	Sub 12	Sub 13	Sub 14	Sub 15	Sub 16	Sub 17	Sub 18	Sub 19	Sub 20
Sub 1																				
Sub 2																				
Sub 3																				
Sub 4																				
Sub 5																				
Sub 6		Si																		
Sub 7																				
Sub 8																				
Sub 9																				
Sub 10	Si	Si	Si		Si	Si			Si											
Sub 11	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si										
Sub 12										Si										
Sub 13	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si								
Sub 14	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si							
Sub 15		Si								Si	Si		Si	Si						
Sub 16										Si	Si		Si	Si						
Sub 17	Si	Si	Si		Si	Si			Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si				
Sub 18		Si	Si	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si			
Sub 19	Si	Si	Si		Si	Si			Si	Si	Si		Si	Si	Si			Si		
Sub 20	Si	Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	

Como se puede ver en la tabla 1, se ha generado una matriz para ese instante concreto del día 03-05-2017 en donde aparecen todas las subunidades que podrían ser regadas con los requisitos establecidos anteriormente. Existen subunidades que no pueden ser regadas utilizando dos combinaciones. Estas subunidades corresponden con los primeros lugares de la tabla (Sub 1, Sub 2, etc.), ya que o bien se encuentran situados en posiciones geográficas más elevadas o debido a su gran tamaño son demandantes de mucha potencia. Por tanto, la herramienta nos está indicando que ciertas subunidades tendrán que ser regadas de forma individual.

La segunda de las vías de análisis corresponde a la selección de una combinación en concreto, siendo en este caso, a modo de ejemplo, la combinación formada por las subunidades 2 y 11. En la figura 5 se puede ver la posición que ocupan las subunidades 02-11 en el plano de la finca.



Figura 5. Posición de las subunidades de riego.

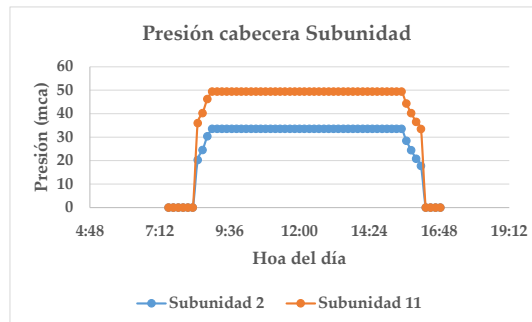


Figura 6. Simulación de presión en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 6 se comprueba como la presión en el hidrante de la subunidad 11 es mayor que la presión en el hidrante de la subunidad 02. Esto es debido a que la subunidad 11 está situada a menor cota, compensando buena parte de las pérdidas de carga por las tuberías. Se observa que, en los primeros y últimos momentos de la mañana y de la tarde respectivamente, la presión en las subunidades es 0 debido a que no existe suficiente potencia para que puedan ponerse en funcionamiento. Sin embargo, a medida que la potencia disponible aumenta, la presión alcanza un máximo, y se mantiene durante gran parte del día, al ser la potencia generada igual o superior a la que necesita la bomba.

De esta manera la herramienta calcula los intervalos de potencias útiles para el funcionamiento de cada combinación de subunidades, permitiendo clasificar aquellos instantes y combinaciones con potencias en exceso que podrían utilizarse para otras combinaciones más restrictivas.

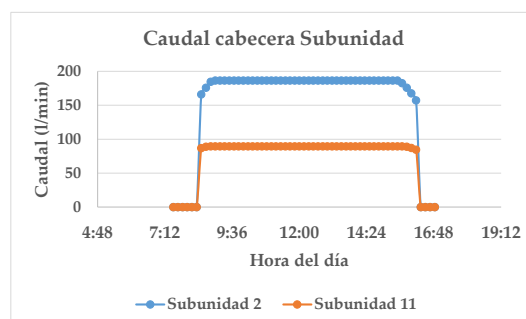


Figura 7. Simulación de caudal en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 7 se muestran los caudales a la entrada de las subunidades 11 y 02, siendo esta segunda de mayor tamaño y estando situada a mayor cota, lo que genera mayor demanda de caudales. No obstante, se alcanza el máximo caudal con irradiancias muy altas y en consecuencia a potencias muy elevadas.

Además, a partir de los datos medidos en el sondeo, se han calculado los caudales extraídos con el fin de no comprometer el aforo máximo del sondeo y comprobar que no sea superado por la combinación de subunidades seleccionada, estableciendo contadores que cuantifiquen el volumen aplicado.

En este caso, la suma de caudales máximos de las subunidades se encuentra dentro de los límites establecidos, siendo adecuada la combinación de las dos subunidades.

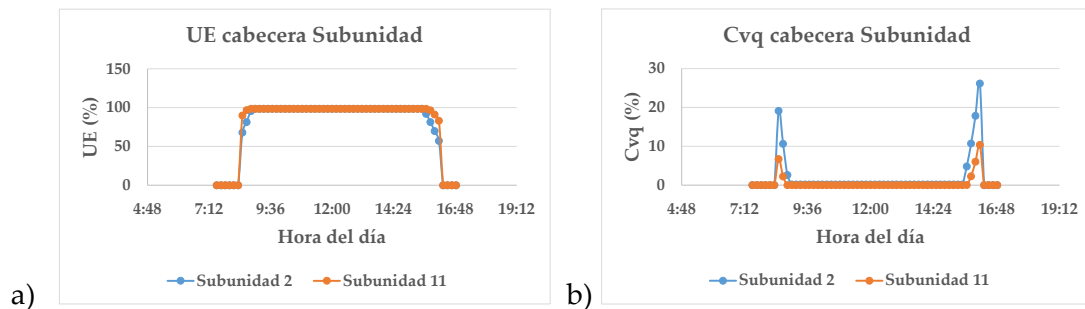


Figura 8. (a) Simulación de UE (%) y (b) Cvq (%) en hidrante para las subunidades 02 y 11.

En la figura 8 a) se puede ver como la UE (Uniformidad de emisión %) para ambas subunidades es máxima conforme la irradiación máxima al ser goteros autocompensantes que trabajan en el rango de compensación, y la potencia disponible es máxima. Se observa que la UE (Uniformidad de Emisión %) en la subunidad 02 tiene valores más bajos en los extremos que la subunidad 11 debido a la mayor demanda de caudales que hace que la potencia generada sea inferior a la necesaria para mantener el caudal máximo de compensación en todos los goteros de la subunidad al inicio y final del riego. Esto se refleja también en la figura 8 b), en donde el Cvq (Coeficiente de variación de caudales %) es mayor en la subunidad 02, y a la posición geográfica que ocupa. No obstante, existe una relación muy clara entre estos dos valores, con lo que la herramienta permite establecer un nivel mínimo de uniformidad de emisión, 85 %, para que puedan realizarse riegos de calidad.

Además, la herramienta permite conocer las horas de riego totales para cualquier combinación, pudiendo hacer un reparto más equitativo de los recursos disponibles teniendo en cuenta las necesidades y requisitos de cada combinación de subunidades. Esta información permitirá, en el caso de que sea necesario, realizar una priorización en el riego de unas subunidades frente a otras.

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.

4. Conclusiones

Se ha generado una herramienta muy robusta capaz de analizar, gestionar y optimizar, de forma integral, las instalaciones de bombeo solar, en cualquier ubicación y características, partiendo de un modelo fotovoltaico que permite cuantificar las potencias a la entrada de la bomba con precisión, teniendo en cuenta las grandes variaciones climáticas que afectan a su rendimiento, y acoplarse a las demandas de un modelo hidráulico para alcanzar los requisitos de caudal, presión, uniformidad de emisión y coeficiente de variación de caudales, entre otros, que se requieren en cada subunidad, lo que permite cuantificar la calidad del riego. De forma automática, la herramienta realiza la selección de las mejores subunidades bajo unos requisitos de calidad y eficiencia en el riego que, por otra parte, contribuirán a reducir el problema adicional de la tendencia a usar más agua de la necesaria para el cultivo al ser prácticamente nulo el coste de la energía fotovoltaica.

Por tanto, esta herramienta ayudará al adecuado diseño y manejo de este tipo de instalaciones, evitando la existencia de serios problemas en el control de agua aplicada y la uniformidad de aplicación debido a programaciones de riego inadecuadas.

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA
3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

Referencias

1. Daccache, A., Lamaddalena, N., and Fratino, U. (2010b), 'On-demand pressurized water distribution system impacts on sprinkler network design and performance', *Irrigation Science*, Vol 28, No 4, pp 331–339
2. Carrión, F., Tarjuelo, J.M., Hernández, D., & Moreno, M.A. (2013). Design of microirrigation subunit of minimum cost with proper operation. *Irrig. Sci.* DOI 10.1007/s00271-013-0399-8
3. 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 Resources Management* DOI: 10.1007/s11269-014-0793-x.
4. 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.
5. Karmeli, D., Keller, J. (1975). Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, 133p.
6. 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.
7. Perez, R., P. Ineichen, E. Maxwell, R. Seals and A. Zelenka, (1992). "Dynamic Global-to Direct Irradiance Conversion Models". *ASHRAE Transactions-Research Series*, pp. 354-369.
8. W. De Soto et al., "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", *Solar Energy*, vol 80, pp. 78-88, 2006.