



INTEGRACIÓN DE MODELOS FOTOVOLTAICO E HIDRÁULICO PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE BOMBEO SOLARES DE INYECCIÓN DIRECTA A SISTEMAS DE RIEGO

Cervera Gascó, J.¹, Del Castillo Sánchez Cañamares, A.², Montero Martínez, J.³, Tarjuelo Martín-Benito, J.M.⁴, Moreno Hidalgo, M.A.⁵

¹ Ingeniero Agrónomo, Contratado Predoctoral; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete, Jorge.Cervera@uclm.es

² Ingeniero Técnico Agrícola, Investigador; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra. de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete; Amaro.Castillo@uclm.es

³ Dr. Ingeniero Agrónomo, Titular de Universidad; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; Jesus.Montero@uclm.es

⁴ Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; Jose.Tarjuelo@uclm.es

⁵ Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Contratado Doctor; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; MiguelAngel.Moreno@uclm.es

Resumen

Los sistemas de riego en agricultura suponen una gran demanda de energía debido a las extracciones desde captaciones subterráneas o superficiales y a la aplicación de la presión necesaria en las subunidades de riego. Actualmente, los elevados precios en los combustibles fósiles y la energía junto a la preocupación por la reducción de las emisiones de CO₂, han propiciado un importante avance en los sistemas de bombeo solar, siendo la energía solar fotovoltaica una energía limpia y renovable, de fácil instalación y mantenimiento, con una larga vida útil y una alta fiabilidad. En el desarrollo de este estudio se ha analizado de forma conjunta el modelo hidráulico y fotovoltaico creado para gestionar el riego por goteo en inyección directa de una plantación de almendro de 90 ha, alimentada con placas solares con el fin de optimizar los valores de presión y caudal necesarios en las diferentes subunidades de riego existentes. Además, se ha tenido en cuenta un aspecto clave como es la uniformidad de emisión para la determinación de la calidad del riego en la explotación.

Abstract

The agricultural irrigation systems spend big quantity of energy to extract water from groundwater or surface water and maintain the pressure demand in the irrigation subunits. At the moment, the high fossil fuels and energy prices moreover the deep concern by the emissions of CO₂ have made that the solar water pumping have had an important impact because the solar energy is clean and renewable energy, easy installation and maintenance with a long service life and great reliability. In this study analyze the hydraulic model and photovoltaic model together used to managing the dripping irrigation by direct injection in almond fields of 90 ha that is fed by photovoltaic system to optimizing the pressure and flow rate in a different subunits. Moreover, another important thing is the uniformity of the system to know the quality of irrigation

1- Introducción y Objetivos

Para impulsar el desarrollo de una agricultura sostenible sería necesario obtener costes bajos y eficientes sistemas de riego que eviten el excesivo bombeo de las aguas subterráneas ayudados por políticas compensatorias entre el ahorro de agua, las emisiones de CO₂ y la producción de alimentos (Daccache et al. 2014).

No obstante, el óptimo de funcionamiento de un sistema de riego debería conseguirse teniendo en cuenta criterios tanto medioambientales, vinculados con la huella hídrica y huella de carbono, como económicos. Por tanto es necesario el desarrollo de herramientas y modelos que puedan contribuir directamente a mejorar el uso del agua y la energía en el regadío.

Los principales aspectos que deberían ser considerados en el proceso de diseño y dirección de un sistema de riego pasan por maximizar la uniformidad, minimizar las pérdidas por evaporación obteniendo el coste total mínimo del sistema determinado sus requerimientos. El diseño de un sistema de riego depende de la forma con la que es alimentado, con las siguientes opciones:

- Sistemas de inyección directa desde la fuente de agua al sistema de riego.
- Desde un depósito o embalse de agua por diferencia de cota.
- Redes colectivas de riego para abastecimiento de agua.

Cada una de estas configuraciones requiere el desarrollo de diferentes algoritmos para el diseño y la optimización del sistema. El sistema más comúnmente utilizado es el de la extracción de agua desde el pozo hasta un embalse mientras exista radiación solar para su almacenamiento, y posteriormente por gravedad o rebombeo realizar la inyección al sistema de riego. En este trabajo el sistema elegido para la realización del estudio es el de inyección directa desde sondeo.

Se han desarrollado numerosos estudios de aplicación de sistemas fotovoltaicos para el riego, como Yu et al. (2011), que realizaron un estudio de viabilidad del riego solar para zonas de pastos en China. Kelley et al. (2010) desarrollaron un estudio de viabilidad de estos sistemas y los compararon con fuentes de energía convencionales, como el gasoil o sistemas eléctricos. Glasnovic y Margeta (2007) desarrollaron un modelo para optimizar la potencia del sistema fotovoltaico. Estos son una pequeña muestra de distintos estudios sobre el bombeo solar para riego.

Moreno et al. (2012) desarrollaron un software para el diseño óptimo de pivot y sistemas laterales alimentados directamente de pozos, considerando la relación teórica entre la curva característica y de rendimiento de la bomba (Moreno et al. 2009), variables hidrológicas (variación temporal del agua), variables de suelo (parámetros de infiltración, capacidad de almacenamiento superficial), variables hidráulicas (pérdidas en cabecera en tuberías, caudal demandado) y variables económicas (costes energéticos, costes de tuberías y bombas) en el proceso óptimo.

Carrion et al. (2013 y 2014) desarrollaron una herramienta DSS (Decision Support System) denominada PRESUD para el diseño óptimo hidráulico de subunidades regulares de riego, tanto localizado como aspersión, con el coste total mínimo (operación e inversión) por unidad regada considerando el tamaño y tipo de bomba junto con el sistema de riego. El uso de estas herramientas hace posible la determinación con exactitud de la uniformidad del sistema.

A pesar de ser numerosos los estudios tanto de sistemas de bombeo solar como de modelización y diseño óptimo de sistemas de riego, no se han encontrado referencias de integración de modelos hidráulicos precisos con modelos de sistemas de producción de energía fotovoltaicos, que permitan gestionar de forma eficiente los sistemas de riego de inyección directa.

2- Materiales y métodos

La realización de este estudio se centra en una finca agraria con una superficie de 90 ha de almendros, con marco de $7 \times 7 \text{ m}^2$ regada mediante un sistema de riego localizado. La finca está situada en el término municipal de Hellín, al sureste de la provincia de Albacete. La finca está dividida en 20 subunidades y cuenta con grandes pendientes incluso entre subunidades.

La finca cuenta con su propio sistema de riego compuesto por la red de distribución, las tuberías terciarias y los ramales portagoteros. Los emisores son autocompensantes, con un caudal de diseño de 1,75 l/h. El agua suministrada a la plantación procede de un pozo subterráneo a la profundidad de 200 m, mediante una bomba sumergida de 26 kW. En la **figura 1** se muestra el plano con las subunidades, la red de distribución, ubicación de la caseta y pozo.

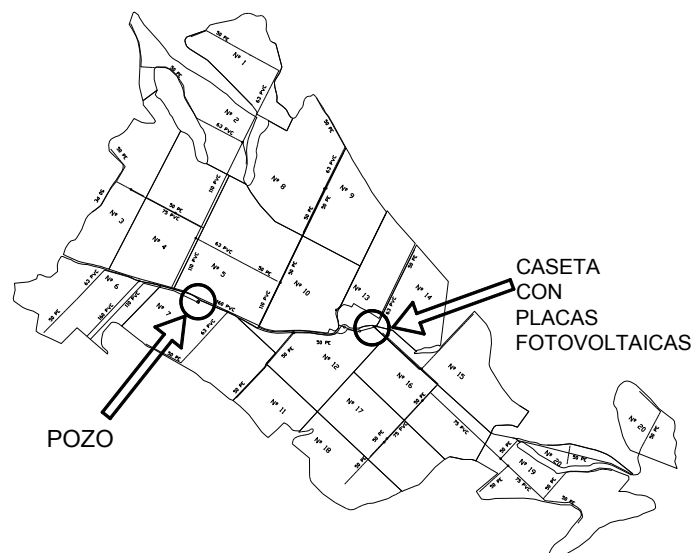


Figura 1. Plano de la finca con las subunidades, la red de distribución, ubicación de la caseta y pozo.

En la cubierta de la caseta, que se encuentra en el interior de la finca, se instalaron un total de 136 paneles fotovoltaicos, con una disposición de 8 ramales en paralelo con 17 paneles por ramal. La potencia instalada es de 31.960 W, siendo la potencia unitaria por panel de 235 W. Para la transformación de la corriente continua generada por los módulos a corriente alterna y gestión de la velocidad de giro de la bomba se utiliza un variador que tiene una potencia de 30 kW. La instalación fotovoltaica está compuesta por los módulos fotovoltaicos, el inversor y el cableado. El cableado está dividido en dos tramos: el primero va de los módulos al inversor, con 1 m longitud y una sección de 150 mm^2 , y el segundo tramo va del inversor a la bomba, con una longitud 450 m y una sección también de 150 mm^2 , todos ellos de aluminio.



Los datos de radiación (W/m^2) y temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) han sido obtenidos de la estación meteorológica de Hellín con coordenadas UTM X: 612321, UTM Y: 4260580 y altitud: 579 m.

Para realizar el análisis con mayor precisión se han desarrollado dos modelos separadamente, un modelo fotovoltaico y un modelo hidráulico. Posteriormente estos dos modelos se han unificado creando un único modelo denominado PRESUD-Solar. Estos han sido programados en MATLAB® (de MathWorks Inc.), con el fin de crear una herramienta que permita analizar y optimizar la distribución de agua en las 20 subunidades irregulares, identificando la presión y el caudal según los distintos niveles de radiación.

Para el desarrollo del modelo hidráulico se ha modelizado el sistema de riego delimitando cada sector, la distribución de las tuberías terciarias, la distribución de los ramales portagotos, ubicación de la válvula en cabecera para cada sector, ubicación del pozo, etc. Mediante la herramienta MATLAB® (de MathWorks Inc.), se han implementado todas las subunidades individualmente, utilizando el modelo digital del terreno (MDT) de la zona para conocer las cotas de todos los emisores, así como las de las válvulas, generando los archivos para su posterior uso en EPANET comandado desde el modelo hidráulico programando en MATLAB®.

La ecuación general usada para el cálculo es la siguiente (Karmeli y Keller, 1975):

$$q_h = K \cdot h_e^x$$

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

Para el cálculo hidráulico se han utilizado las librerías de EPANET (Rossman, 2000) programadas en MATLAB® (de MathWorks Inc.), obteniendo la curva Q-H para cada subunidad considerando la válvula en cabecera como un único emisor en toda la subunidad calculando la presión y el caudal en cabecera. Además de ello se ha obtenido la uniformidad de emisión que dará idea de la distribución de agua apropiada.

Las pérdidas de carga generadas desde el inicio del pozo hasta la válvula de cabecera de cada subunidad se han calculado mediante la fórmula de Hazen-William siendo mayoradas en un 10%. Se puede utilizar también la ecuación de Darcy-Weisbach o Scimemi.

$$h_f = 10,62 C^{-1,85} D^{-4,87} Q_0^{1,85} L$$

Los datos de entrada necesarios al modelo son el plano de simulación de la subunidad, la curva característica de la bomba, longitudes y diámetros de las tuberías de distribución y el dato de la presión máxima admisible en los ramales portagotos.

Para el desarrollo del modelo fotovoltaico se han tenido en cuenta diferentes etapas que se explican a continuación.

1º etapa: Captación de la radiación solar

En esta etapa la radiación solar sobre plano horizontal (IH) captada por el piranómetro (expresada en W/m^2) obtenida de la estación meteorológica más cercana es transformada a radiación solar sobre plano inclinado (IT) teniendo en cuenta características tales como la inclinación de las placas (s) ($^\circ$), la latitud (φ), la constante solar (I_{sc}) (W/m^2), el albedo (ρ) (adimensional), el día Juliano, la radiación incidente sobre plano horizontal (IH) (W/m^2) y la temperatura ambiente ($^\circ C$).

La radiación solar sobre plano inclinado (IT) se expresa de la siguiente manera:

$$IT = R \cdot IH$$

Siendo:

R = Factor de conversión (Liu y Jordan 1960; Duffie y Beckman, 1996)

IH = radiación solar sobre plano horizontal

2º etapa: Cálculo de la potencia máxima del generador según el nivel de radiación

Para los cálculos que se van a realizar en esta etapa se han obtenido las características de trabajo de los paneles fotovoltaicos que han sido suministradas por el fabricante tales como la Corriente de Cortocircuito (Short Circuit Current, ISC) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en amperios, la Tensión a Circuito Abierto (Open Circuit Voltage, VOC) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en voltios, la Temperatura de Operación Nominal de la Célula (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT) en grados centígrados, la Tensión en el punto de máxima potencia (V_{MAX}) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en voltios, la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MAX}) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en amperios y el número de células en serie.

Los parámetros calculados más importantes según la radiación solar, con el fin de obtener la potencia máxima del generador, son los siguientes:

- Corriente de cortocircuito de la célula (ISC).
- Temperatura de trabajo de la célula.
- Tensión de circuito abierto de la célula (VOC).
- Tensión de célula normalizada.
- Voltaje térmico.
- Factor de forma ideal sin considerar la resistencia serie.
- Resistencia normalizada.
- Factor de Forma en STC.
- Tensión en el punto de máxima potencia (V_{MAX}).
- Corriente en el punto de máxima potencia (I_{MAX}).
- Máxima potencia del panel (P_{MAX}), calculada como $I_{MAX} \cdot V_{MAX}$

3º etapa: Cálculo de la potencia máxima del generador fotovoltaico

En esta etapa se han calculado, según la potencia máxima del panel obtenida anteriormente, la potencia máxima suministrada por el generador fotovoltaico, a partir de la tensión máxima del generador fotovoltaico y de la corriente máxima del generador fotovoltaico.



Además, se han calculado las pérdidas de potencia que se producen en los módulos fotovoltaicos debido a que estos operan en condiciones diferentes a las estándar teniendo en cuenta pérdidas por:

- Pérdidas de potencia debidas al polvo sobre los módulos FV.
- Pérdidas de potencia por dispersión de parámetros entre módulos.
- Pérdidas de potencia por reflectancia angular espectral.

4º etapa: Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado de los módulos fotovoltaicos al inversor.

En esta etapa se calculan las pérdidas de potencia que se producen en el cableado que une los módulos fotovoltaicos hasta el inversor. Para su cálculo se ha utilizado el criterio de la resistencia del conductor empleando además la intensidad máxima circulante por el conductor y el número de conductores tratándose de corriente continua.

5º etapa: Cálculo de la potencia del inversor.

En esta etapa se ha calculado la potencia de entrada al inversor en continua calculándose el rendimiento del inversor teniendo en cuenta los coeficientes de pérdidas características del inversor mediante los valores medios obtenidos por (Schmidt 1992) a partir de una muestra representativa de inversores existentes en el mercado.

6º etapa: Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado del inversor a la bomba.

En esta etapa se calculan las pérdidas de potencia que se producen en el cableado que une el inversor a la bomba. El cálculo general es el mismo que para la 4º etapa siendo el único cambio la obtención de la corriente circulante del conductor al tratarse de corriente alterna en trifásica.

7º etapa. Cálculo de la potencia de entrada de la bomba

En esta etapa se ha obtenido la potencia de entrada de la bomba en corriente alterna como la diferencia entre la potencia de salida del inversor y las pérdidas de potencia en el cableado.

Una vez obtenidos y evaluados los resultados de potencia de la bomba para cada modelo estudiado según los parámetros característicos descritos anteriormente mediante la herramienta MATLAB® (de MathWorks Inc.) se han unificado permitiendo conocer para cualquier día del año y con datos de radiación solar tomados cada media hora del día conocer los valores de presión, caudal y uniformidad de emisión en cualquier subunidad.

3- Resultados y discusión

En las **figuras 2 y 3** se representa la relación entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 1 a la 10 y de la 11 a la 20 respectivamente.

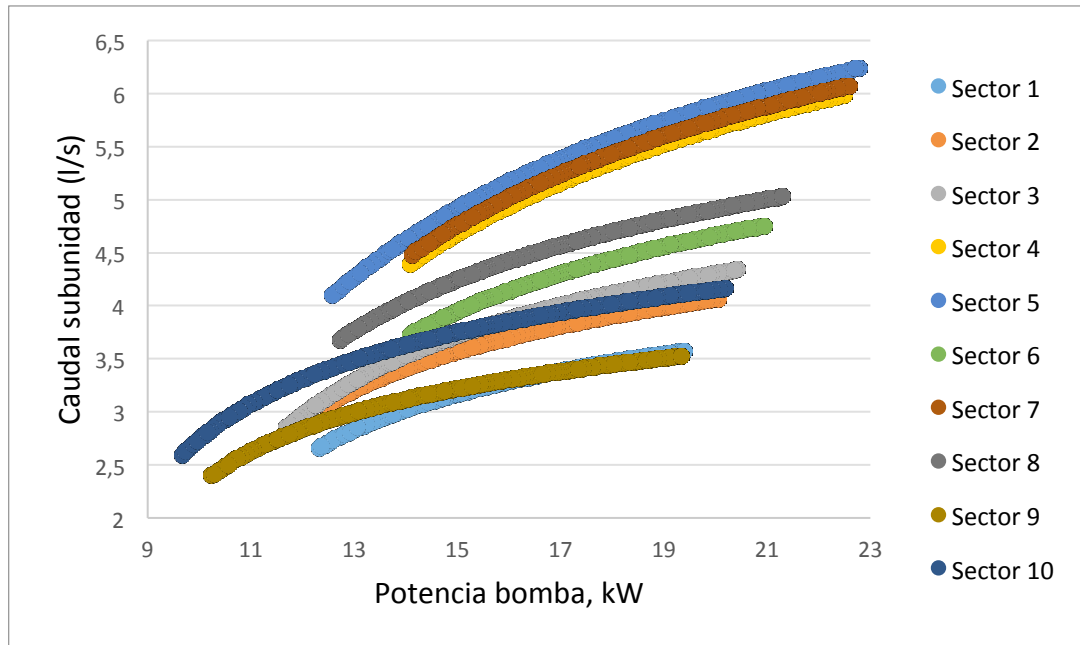


Figura 2. Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 1 a la 10.

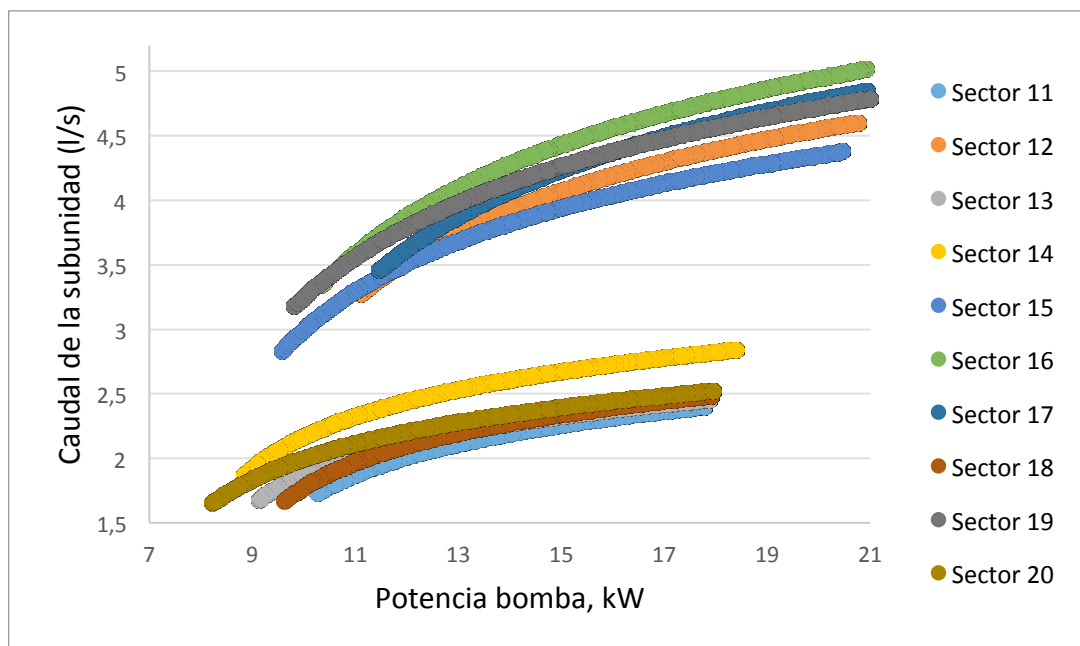


Figura 3. Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 11 a la 20.

Los resultados reflejados en las figuras anteriores muestran que existen algunas subunidades que presentan disponibilidades de caudales y potencias elevadas mientras en otras subunidades los caudales y potencias disponibles son reducidos. Esto da una idea de cuales son aquellas subunidades las cuales es posible obtener a igualdad de potencia unos caudales mayores.

De la misma forma, en las **figuras 4 y 5** se representa la relación entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión de las subunidades, de la 1 a la 10 y de la 11 a la 20, respectivamente.

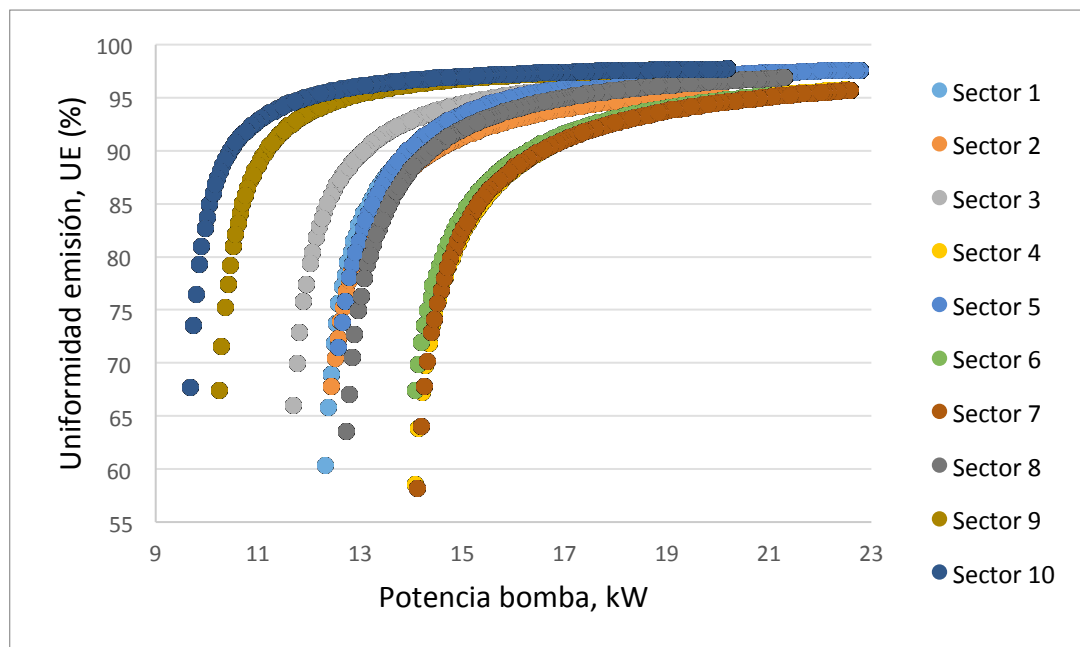


Figura 4. Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión suministrados por las subunidades de la 1 a la 10.

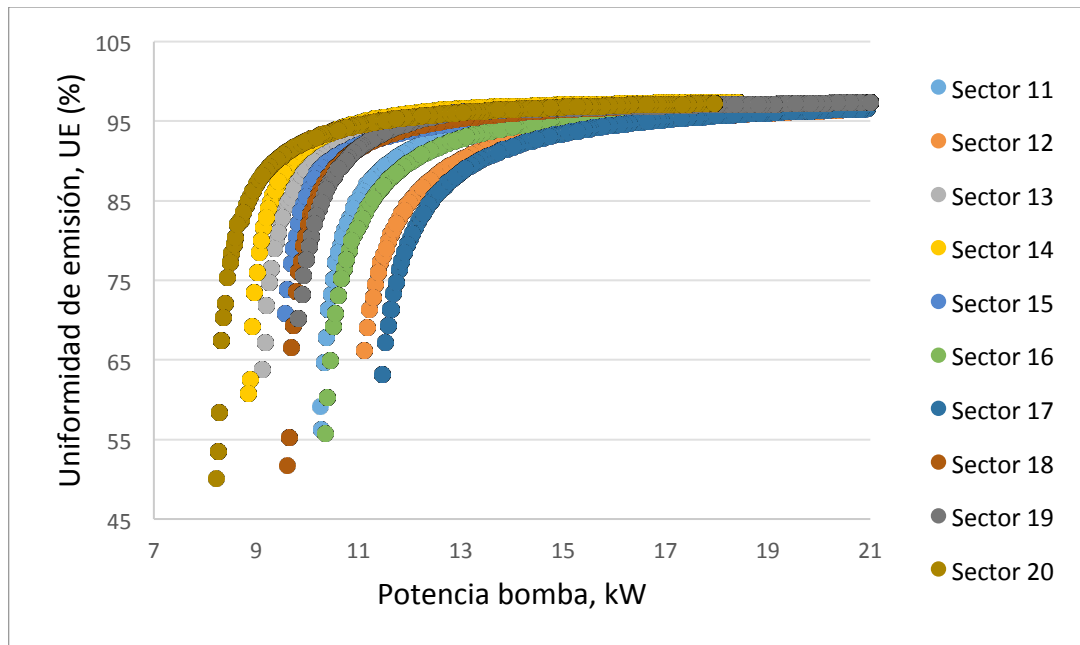


Figura 5. Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión suministrados por las subunidades de la 11 a la 20.

Los resultados reflejados en las figuras anteriores muestran que existen subunidades con valores de uniformidad de emisión alta coincidentes con las que tienen caudales altos incluso a bajas potencias mientras que otras subunidades no alcanzan una buena uniformidad de emisión hasta que las potencias absorbidas son elevadas.

Esta información será utilizada para desarrollar un modelo de ayuda a la toma de decisiones enfocado hacia la secuencia de activación de cada sector y el tiempo de riego adecuado según los niveles de radiación existentes y esperados.

4- Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones más importantes obtenidas en este estudio indican la clara influencia que tienen los diferentes niveles de radiación solar que se producen durante el día para alcanzar los requisitos establecidos en cada subunidad de caudal, presión y uniformidad de emisión. Esto se observa más claramente en aquellas subunidades que presentan condiciones más desfavorables en donde las necesidades de potencia son mayores, propiciando que no se puedan alcanzar con tanta facilidad los requisitos de caudal, presión y uniformidad de emisión deseados.

Por tanto, la cuantificación precisa de estos valores permite adecuar la secuencia de riego de las distintas subunidades a los niveles de radiación estimando de forma precisa los caudales suministrados en cada periodo. Además, la herramienta generada permite determinar la uniformidad de emisión en la subunidad y por lo tanto determinar la calidad del riego y no sólo el volumen suministrado.



5- Bibliografía

- 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., 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.
- Daccache, A., Ciurana, J.S., Rodriguez Diaz, J.A., Knox, J.W. (2014). Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.*, 9, 124014 (12pp).
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1996). *Solar Energy Thermal Processes*. Ed. Pergamon. Madrid
- Glasnovic, Z., Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar Energy*, 81, 904–916.
- Karmeli, D., Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design*. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, 133p.
- Kelley, L.C., Gilbertson, E., Sheikh, A., Eppinger, S.D., Dubowsky, S. (2010). On the feasibility of solar-powered irrigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2669–2682.
- Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1-19.
- Moreno, M.A., Medina, D., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M. (2012). Optimal design of centre pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Management*, 107, 112-121.
- Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Carrión, P.A. (2009). Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosyst. Eng.*, 102 (1), 95-105.
- 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.
- 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.
- Yu, Y., Liu, J., Wang, H., Liu, M. (2011). Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. *Applied Energy*, 88, 3176-3188.