

MASTER INVESTIGACIÓN
EN INGENIERÍA PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL
Escuela Técnica Superior de
Ingenierías Agrarias

TRABAJO FIN DE MASTER

Estudio del modelo energético de autoconsumo con balance neto para el riego agrícola mediante energía fotovoltaica



Universidad de Valladolid

Jose Ignacio Hernández Calzada
Tutor: Luis Manuel Navas Gracia
3/07/2012



ESTUDIO DEL MODELO ENERGÉTICO DE AUTOCONSUMO CON BALANCE NETO PARA EL RIEGO AGRÍCOLA MEDIANTE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Jose Ignacio Hernández Calzada

Máster en Investigación para el Desarrollo Agroforestal, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (ETSIIAA), Universidad de Valladolid, Avda. de Madrid 57, 34004 Palencia, España
e-mail: joseignacio.hernandezcal@gmail.com

Resumen: El presente estudio examina la viabilidad económica de implantación de sistemas de energía fotovoltaica para suplir la energía eléctrica necesaria en los sistemas de riego agrario mediante un modelo de autoconsumo con balance neto con la red eléctrica. Para ello, se evalúan las necesidades hídricas de una rotación de cultivos específica en 4 zonas de Castilla y León, estableciendo los costes de la energía eléctrica para el suministro de riego. Únicamente en los casos de sistemas de riego con instalaciones fotovoltaicas con tamaños cercanos a los 100 kW y con tiempos de amortización de 30 años serían competitivos con los precios de la energía de red actuales.

Palabras claves: autoconsumo, balance, fotovoltaica, neto, riego.

Abstract: *This study examines the economic feasibility of implementation of PV systems to supply the electricity needed in agricultural irrigation systems through a model of consumption with net balance with the grid. This is done by assessing the water needs of a specific crop rotation in 4 regions of Castilla y León, establishing the cost of electricity for irrigation supply. Only in cases of irrigation with photovoltaic systems with sizes close to 100 kW and amortization period of 30 years would be competitive with the energy prices current network.*

Keywords: *balance, irrigation, net, photovoltaic, self consumption.*

1. Introducción

La producción agraria a nivel mundial tiene dos misiones básicas: abastecer de alimentos a la población humana y promover su desarrollo económico y social. El que la actividad agraria sea competitiva en un mercado mundial cada más globalizado condiciona el futuro de muchas explotaciones en su viabilidad económica, dentro del marco de una agricultura sustentada, sostenida y perdurable, donde la tecnología aplicada reduzca los posibles impactos ambientales, conserve los recursos naturales (genéticos, suelo, agua, etc.) y contribuya a la equidad social. La agricultura representa un sector de gran importancia en la Comunidad de Castilla y León, donde el 5,8% del valor añadido bruto de la región corresponde al sector agrario, superando en dos puntos la media nacional (Gómez-Limón et al., 2008).

El riego es una técnica que se ha ido implantando en las explotaciones agrarias desde hace varios siglos, y que permite aumentar la superficie susceptible de ser cultivada y el consiguiente aumento de

producción. Además, en aquellas zonas donde el recurso del agua es un factor limitante para el logro de elevadas productividades, la implantación de sistemas de riego supone un aumento sustancial en los resultados de producción. Las productividades de un cultivo en regadío son entre 2 y 3 veces superiores a las de secano (Decimavilla, 1998), además de permitir el cultivo de ciertas especies con especial sensibilidad a la escasez de precipitaciones. También debe destacarse que la agricultura ha estado siempre expuesta a la incertidumbre y los azares de la dinámica natural. El riego reduce la incertidumbre típica de las actividades dependientes de sistemas y fenómenos naturales, cuya minimización estimula al agricultor a invertir en la actividad agrícola con una perspectiva a más largo plazo y efectos positivos sobre la producción.

Castilla y León cuenta con una superficie de regadíos que puede cifrarse en 544.500 ha, lo que viene a suponer aproximadamente el 6% de la superficie total de nuestra Comunidad y un 10,48% de su superficie agraria útil, con más un 90% de dicha superficie perteneciente a la cuenca



hidrográfica del Duero (Bayón et al., 1999). Esta superficie es inferior a la media nacional, que se sitúa en un 15%, y considerablemente menor a la de otros países como Paquistán, con un 77%, Japón, con un 63%, o Egipto, con un 100% (Rangeley, 1989).

Si bien la tecnología de riego incrementa las posibilidades de cultivos y su productividad, la rentabilidad de su aplicación está expresamente ligada a los costes de inversión y operación de estos sistemas. Un parámetro de gran importancia es la energía necesaria para operar los sistemas de riego, cuyo precio repercute directamente en los costes de operación del sistema y representan la parte mayoritaria. En general, los sistemas de riego emplean bombas para la impulsión de agua que funcionan con gasóleo o electricidad, cuyos precios se han incrementado de forma sustancial. El coste en España del gasóleo agrícola se ha incrementado más de un 300% desde el año 2002 al 2011, mientras que la electricidad se ha incrementado en más de un 155% en las mismas fechas. Este aumento del precio de la energía es un tema de especial preocupación, ya que en muchos casos el precio de los productos hace inviable la operación de los sistemas de riego.

En busca de soluciones que suministren energía a los sistemas de riego, se han desarrollado en los últimos años instalaciones de energía solar fotovoltaica. El uso de la energía solar fotovoltaica ha sido bien estudiado e implementado (Barlow, 1993; Roul R. India's solar). En el 2003, Shell y WorldWater&Power Corporation instalaron una bomba de 50 caballos con una instalación fotovoltaica de 36 kW (California Solar Center), pero fue una demostración y el riego mediante energía fotovoltaica a gran escala no ha sido implantado.

Se han realizado estudios de viabilidad técnica y económica en numerosas ocasiones. Estudios centrados en sistemas con requerimientos de potencia cercanos a 1 kW han sido estudiados en lugares como Namibia, Jordania y la India (NAMREP, 2006; Meah, 2008; Mahmoud, 1990). Evaluaciones específicas basadas en la radiación solar han sido estudiadas en Bostwana y Sudan (Hamidat, 2003; Anderson, 2000; Omer, 2001). Un método para determinar el tamaño de una instalación de riego fotovoltaica basado en el clima, localización, calidad del suelo y necesidades de agua fue aplicada a 10 hectáreas de olivo cerca de Badajoz (Cuadros et al., 2004), aunque sin tener en cuenta las consideraciones económicas. Los resultados de estos estudios desprenden que los sistemas de riego mediante energía fotovoltaica sólo son económicamente viables para bajas potencias, con bombeos de altos caudales de pozos poco profundos o bajos caudales de pozos en profundidad.

Uno de los principales problemas para la implantación de la energía fotovoltaica en los sistemas de riego a gran escala es que las necesidades de riego son mayoritariamente estacionales, mientras que la producción fotovoltaica se da a lo largo del

año. Debido a ello, los sistemas fotovoltaicos deben ser dimensionados para el periodo de mayor demanda, quedando sobredimensionados, o incluso sin uso, durante otras partes del año. De esta forma, el aprovechamiento de la instalación es reducido y su amortización difícil de afrontar. Existe la posibilidad del uso de batería o balsas y depósitos como sistemas de inercia, pero no son efectivos para explotaciones a gran escala.

Otra posibilidad es el uso de la red eléctrica como fuente de almacenamiento de energía, de tal forma que la instalación fotovoltaica se dimensione para los requerimientos de energía anuales, y que en caso de exceso o escasez de producción eléctrica, la red sirva de sistema de intercambio. Esta opción puede darse en el caso que los generadores de energía eléctrica puedan funcionar en régimen de autoconsumo con un balance neto con la red eléctrica, legislación que está siendo debatida y pendiente de ser aprobada en el año 2012 en el Estado Español. En el caso particular del riego agrícola, la energía generada sería vertida a la red cuando no sea consumida por el sistema de riego, y este tomaría energía de la red cuando su demanda sea superior a la de generación; en un sistema de balance neto. Este tipo de modelo sólo sería de aplicación en aquellos sistemas que tengan acceso a un punto de conexión eléctrica.

En el presente estudio se evaluará la viabilidad económica de implantación de un sistema fotovoltaico sobre suelo formando parte de la unidad de riego, de tal forma que genere una cantidad de energía eléctrica igual a las necesidades eléctricas del sistema de riego. Para ello, en primer lugar se evaluarán las necesidades hídricas de una serie de cultivos en distintas zonas de Castilla y León, y posteriormente se establecerá el coste de la energía para dicho riego cultivos mediante el uso de fotovoltaica.

2. Métodos

2.1. Cultivos y necesidades hídricas

En el estudio se han evaluado las necesidades de riego de una rotación de cultivos específica para diferentes zonas geográficas de Castilla y León. Las zonas de estudio seleccionadas se corresponden con las cuatro áreas de la figura 1, donde la representatividad de cada una de ellas está dada por una estación meteorológica, siendo la estación de Zotes del Páramo para la zona de León, la estación de Tordesillas para la zona sur, la estación de Fuentes de Navas para la zona de Palencia y la estación de Vadocondes para la zona de Burgos.

La representatividad de estas estaciones para las distintas zonas ha sido comprobada por la Asociación de Investigación para la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA) a lo largo de

numerosos años y son los subsectores utilizados en los planes de asesoramiento de riegos que se publican anualmente.



Fig. 1. Mapa de Castilla y León con las zonas de estudio.

La rotación elegida ha sido remolacha-cebada-maíz-girasol-trigo, con el objeto de seleccionar cultivos propios de la zona y con una gran demanda de agua como la remolacha, el maíz y el girasol; y alternados con cereales como el trigo y la cebada. La rotación de cultivos evita la aparición de malas hierbas y plagas difíciles de controlar, así como una mejora de la gestión de nutrientes del suelo.

Las necesidades de riego de los cultivos han sido calculadas como la diferencia entre las necesidades de agua del cultivo y la precipitación efectiva. Estas necesidades de agua del cultivo vienen dadas por el concepto de evapotranspiración del cultivo, y se han determinado por la relación entre los coeficientes de cultivo utilizados y la evapotranspiración de referencia:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

Para el estudio se ha tomado la serie de datos correspondientes al período 2001-2011. Los datos de la evapotranspiración de referencia y precipitación han sido proporcionados por el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) en las distintas estaciones mencionadas, mientras que los coeficientes de cultivo han sido obtenidos del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL) y AIMCRA.

2.2. Sistema de riego

Por las características de los cultivos, se ha elegido como modelo de estudio el sistema de riego mediante pivó central. Los consumos energéticos de riego en estos sistemas son muy variados, ya que dependen de la tipología del terreno, características de los equipos, régimen de funcionamiento, desgastes, etc. Granda (1998) estima los consumos para un pivó de 5 tramos más voladizo (294 m), con

abastecimiento de agua a 800 metros del centro del pivó y una perforación de 140 metros de profundidad, en 39,54 kWh para un caudal de 136 m³/h, dando un consumo específico de 0,29 kWh/m³ de agua regada. En el caso del consumo considerando la toma de agua a pie de la cabeza del pivó, con un pivó de 400 metros, el consumo específico se encuentra entre los 0,098 y 0,132 kWh/m³ de agua regada según la presión necesaria (Maskey et al., 2006). Waldir (2000) menciona en los índices más utilizados en el análisis económico de procesos agrarios un consumo de 0,35 kWh/m³ para sistemas de riego mediante pivó, mientras que en auditorías energéticas realizadas en sistemas de regadío de la comunidad de regantes del Carracillo, se cifra el consumo energético de riego mediante pivó desde río en 0,85 kWh/m³ de agua regada (Diputación de Segovia). Cezar de Lima (2008) refleja en sus estudios un consumo específico de entre 0,421 y 0,731 kWh/m³ de agua bombeada para distintos sistemas de pivó evaluados con diferentes características de terreno. Marquelli (1994) estima los consumos específicos de energía en métodos de irrigación por aspersión entre los 0,2 y 0,6 kWh/m³.

En el estudio se han analizado los casos de las distintas zonas de estudio para los términos de consumos específicos de 0,2 y 0,6 kWh/m³ de agua regada, y con eficiencia de riego de un 80%, propia de los sistemas de riego mediante pivó (Tarjuelo, 2005).

2.3. La regulación del mercado eléctrico

La producción de energía fotovoltaica está dentro del concepto de Régimen Especial, en el que se engloba la producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas, de cogeneración y otras abastecidas por recursos o fuentes renovables (Ley 40/94). En el caso de la energía eléctrica producida por instalaciones de Régimen Especial, el Real Decreto 2366/1994 dispone que la empresa distribuidora más cercana tiene la obligación de adquirir la energía excedentaria de estas instalaciones siempre que sea técnicamente viable.

El Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en Régimen Especial, mantiene que la energía producida en Régimen Especial puede ser vendida a la red mediante una tarifa regulada o a precio de mercado. La generación renovable que participa en el mercado recibirá una prima variable en función del precio de mercado y unos límites superior e inferior (cap & floor).

Este sistema de producción de energías renovables está basado en la venta a la red de la energía excedentaria, que en la mayoría de los casos supone únicamente el caso de generación. En otros países europeos como Alemania e Italia está desarrollado el sistema de autoconsumo, por el que la producción de energía eléctrica se basa en la

demanda del propio usuario, pero permite que la red equilibre el balance entre generación y consumo interno

En España se ha aprobado recientemente el RD 1699/2011, que incorpora ya referencias explícitas a las instalaciones destinadas a autoconsumo de menos de 100 kW. Para el desarrollo completo de la normativa del autoconsumo ha de regularse el concepto de balance neto, ya que el RD 1699/2011 establece la normativa de conexión a la red, pero no regula el sistema de intercambio de energía. Por el concepto de balance neto se entiende el establecimiento de un mecanismo por el cual se compensen las diferencias entre la generación y el consumo del usuario, vertiendo a la red el exceso de producción eléctrica y tomando electricidad de la red en los casos en los que el consumo sea superior a la generación.

En la regulación del modelo de balance neto, los puntos de mayor importancia son el período de balance y las tarifas de acceso por uso de la red. El período de balance es el tiempo durante el cual se compensan la generación y el consumo, hablando de la posibilidad de un balance diario, semanal, anual, bianual... Para estudiar la posibilidad de aplicación de la energía fotovoltaica en el riego agrícola bajo este modelo de gestión eléctrica, se considera un período de balance de 5 años, ya que por las características de los cultivos, la demanda energética de los sistemas de riego varía de unos años a otros.

Por otro lado, también falta de regularse los peajes de acceso de la energía que se vierte a la red cuando hay un exceso de generación, o cuando se toma de la red cuando hay demanda de consumo superior a la generación. En el caso de estudio se establece un peaje nulo en el uso de la red por cada kWh de energía intercambiado, ya que toda la energía generada por el sistema fotovoltaico se dará durante las horas diurnas y a lo largo de todo el año, mientras que el consumo de energía eléctrica por parte de los sistemas de riego se dará de forma estacional y mayormente nocturna. Según este principio, la mayor parte de la energía será cedida a la red eléctrica en los momentos de mayor demanda, donde la energía es más cara, mientras que los consumos de riego se darán en franjas horarias donde el precio de la energía es menor. La diferencia del precio de la electricidad entre las horas centrales del día y las nocturnas es de más de 20 €/MWh según los datos del Operador del Mercado Ibérico Español (OMIE). Esto, junto a la generación de energía de forma descentralizada y la disminución de los gases de efecto invernadero, con la reducción del pago de las tasas de emisión, justifican la hipótesis de peaje nulo.

2.4. Energía fotovoltaica

Para el caso de estudio se considera el modelo de una planta fotovoltaica en suelo conectada a red. Esta

planta irá conectada a la red en el mismo punto de toma de electricidad que los componentes del riego, de tal forma que cuando se produzca electricidad, esta sea consumida por el sistema de riego o vertida a la red. Los componentes de la planta serán los paneles fotovoltaicos, las estructuras de soporte de los paneles, los inversores, el material eléctrico y la caja general de protección y medida antes de la conexión a la red.

Para analizar la viabilidad económica del estudio, se ha obtenido la energía eléctrica generada por una instalación fotovoltaica en las distintas zonas propuestas (tabla 1), así como los costes de inversión y operación y mantenimiento de una instalación fotovoltaica a partir de precios de mercado de diversas empresas del sector español.

Tabla 1. Producción de energía eléctrica por kW pico fotovoltaico instalado y año en las distintas zonas.

Zona	KWh/KWp*año
Estación de Tordesillas	1340
Estación de Zotes	1270
Estación de Fuentes de Nava	1300
Estación de Vacocondes	1350

Fuente: *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*.

En la figura 2 puede observarse la variación de los costes de inversión según la potencia instalada, disminuyendo el ratio €/Wp a medida que aumenta el tamaño de la instalación. Entre los principales costes cabe destacar la parte debida a los módulos fotovoltaicos (40%), el inversor (10%) y el material eléctrico (10%). El resto de los costes se debe a estructuras, mano de obra, maquinaria, licencias, obra civil y costes menores.

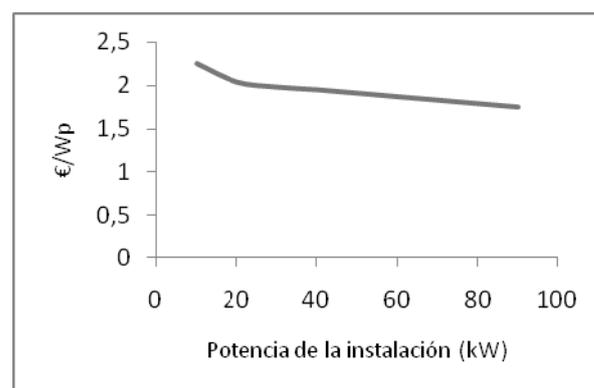


Fig. 2. Costes de inversión de una instalación fotovoltaica.

Los costes de operación de una planta fotovoltaica se basan en el seguimiento de la instalación y la seguridad, mientras que los de mantenimiento se puede concretar en las tareas de mantenimiento preventivo y el reemplazo de material eléctrico cuando sea necesario. Estos costes dependen

en gran medida de la implicación del usuario, ya que algunas tareas pueden ser desempeñadas por el usuario y reducir los costes significativamente. La necesidad de elementos de seguridad (alarmas, etc.) tiene una gran influencia en el coste en instalaciones de pequeña potencia, pero su necesidad depende de la ubicación de la instalación e índices de delincuencia. En la figura 3 pueden observarse estos costes, incluyendo todos los aspectos mencionados, en caso de contratación a una empresa especializada según el tamaño de la instalación.

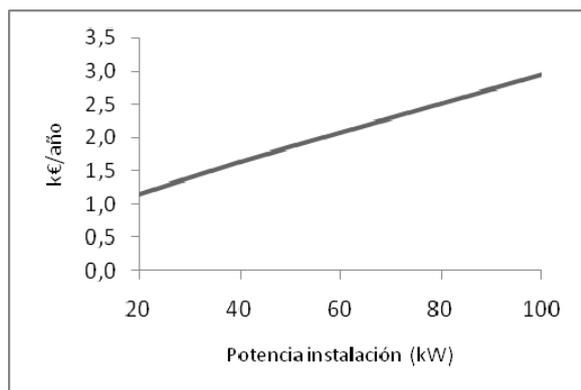


Fig. 3. Costes de operación y mantenimiento en una instalación fotovoltaica.

3. Resultados y discusión

Las necesidades de riego de los diferentes cultivos mostradas en la tabla 2 presentan ligeras diferencias de unas zonas a otras, mientras que son significativas cuando comparamos los años de plantación de cereales con el resto de cultivos.

Tabla 2. Necesidades de riego (mm/m²) de los cultivos en las zonas de estudio.

	Zona Tordesillas	Zona Zotes	Zona Fuentes de Nava	Zona Vadocondes
Remolacha	573,74	493,44	539,91	470,45
Cebada	261,80	219,92	221,67	161,55
Maíz	480,50	419,12	456,17	373,75
Girasol	477,69	427,37	426,17	395,61
Trigo	388,65	342,76	341,09	279,65

En la tabla 3 pueden observarse los requerimientos de energía acumulados a lo largo de cinco años en función de los costes energéticos específicos del sistema de riego. Esta acumulación de consumos es posible gracias al sistema de balance neto, y ayuda a compensar las diferentes necesidades energéticas del riego cada año.

A partir de los datos anteriores se determina la potencia de instalación fotovoltaica para suplir dichas cantidades de energía (tabla 4). La producción de energía eléctrica en las instalaciones es mayor en las

regiones con menos precipitaciones, por lo que las necesidades de potencia instalada se compensan ligeramente en las zonas más secas. Esta potencia instalada deberá proporcionar una cantidad de energía igual a la requerida por los sistemas de riego, y su producción, aunque tiene ligeras variaciones de un año a otro, es bastante estable.

Tabla 3. Consumos energéticos de los sistemas de riego para distintos consumos específicos a lo largo de 5 años.

Consumo específico (kWh/m ³)	Zona Tordesillas	Zona Zotes	Zona Fuentes de Nava	Zona Vadocondes
	Consumo energético (kWh/ha)			
0,2	5.456	4.757	4.963	4.203
0,6	16.368	14.270	14.888	12.608

Tabla 4. Potencia de instalación fotovoltaica necesaria por hectárea de cultivo en función del consumo específico.

Consumo específico (kWh/m ³)	Zona Tordesillas	Zona Zotes	Zona Fuentes de Nava	Zona Vadocondes
	Potencia instalada (kW/ha)			
0,2	0,81	0,75	0,76	0,62
0,6	2,44	2,25	2,29	1,87

En el caso de estudio, se toma de referencia la instalación fotovoltaica necesaria para suministrar energía a un sistema de pívot central que riega una parcela de 40 hectáreas. Con los costes de inversión y la energía generada, se ha calculado el coste que tendría el kWh eléctrico. Para la determinación de este precio hay que tener en cuenta la vida útil del sistema, o el plazo de amortización del mismo. La durabilidad de los paneles fotovoltaicos es superior a los 40 años, y los fabricantes dan unas garantías de pérdidas de producción en los módulos fotovoltaicos inferiores a un 10% en los primeros 10 años, y de un 20% en 25 años. Pese a estas garantías, muchos casos reales demuestran que esta pérdida de capacidad de producción es mínima, quedando lejos de los márgenes dados por los productores de paneles. En el estudio, se ha considerado una pérdida de productividad anual de un 0,5%.

En el estudio del precio del kWh eléctrico, se relaciona la inversión entre la energía producida por el sistema durante un periodo de años, eligiendo los casos de 10, 20 y 30 años para las distintas zonas de estudio. Si bien la vida útil de los módulos fotovoltaicos es superior a los 30 años, no se tendrá en cuenta un periodo de vida superior. Además, se tienen en cuenta los costes de operación y mantenimiento anuales de las instalaciones, que son repercutidos sobre el precio del kWh.

En la tabla 5 puede observarse el precio de la electricidad que tendría la instalación de este tipo de

sistemas. El precio de la electricidad para el caso de una vida útil de 10 años es muy superior a los dos casos restantes, por lo que la viabilidad de este tipo de sistemas para pequeños plazos de tiempo no sería asumible (figura 4). También puede observarse que el precio de la electricidad es más barato en el caso de los consumos específicos de 0,6 kWh/m³ de agua regada, debido a que las instalaciones en estos casos son de mayor tamaño. Esto se debe a que tanto en la inversión, y sobre todo en los costes de operación y mantenimiento, la economía de escala tiene gran influencia en este tipo de instalaciones (figura 5).

Tabla 5. Precios de la electricidad para los distintos casos de estudio.

Años vida útil	Consumo específico kWh/m ³	Precio kWh (c€/kWh)			
		Zona Tordesillas	Zona Zotes	Zona Fuentes de Nava	Zona Vadocondes
10	0,2	18,79	19,82	19,37	19,19
	0,6	15,17	16,49	16,11	16,11
20	0,2	11,43	12,06	11,78	11,78
	0,6	8,85	9,62	9,40	9,43
30	0,2	8,98	9,48	9,26	9,31
	0,6	6,75	7,34	7,17	7,21

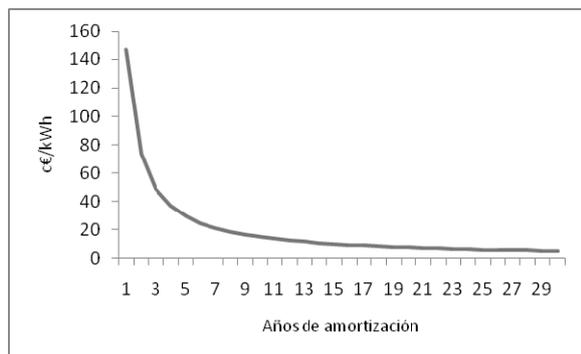


Fig. 4. Evolución del precio del kWh en función de los años de uso de la instalación para el caso de la zona de Tordesillas con un consumo específico de 0,2 kWh/m³ de agua regada (sin costes de operación y mantenimiento).

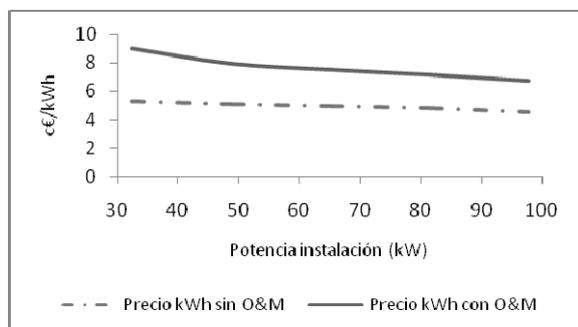


Fig. 5. Evolución del precio del kWh en función de la potencia de la instalación fotovoltaica para el caso de una vida útil de la instalación de 30 años en la zona de Tordesillas.

Si bien hemos establecido el precio de la electricidad en los diferentes escenarios, debe tenerse en consideración que la instalación fotovoltaica supone una inversión significativa. El precio de la electricidad puede ser reducido a largo plazo, pero ello conlleva una inversión inicial que es necesario financiar.

En la tabla 6 se reflejan los costes del kWh resultante considerando que la inversión se realiza mediante un aporte de un 20% de fondos propios, y el 80% restante es financiado mediante un préstamo bancario a un 3,5% de interés. Los años de amortización del préstamo serán igual a los años de vida útil de la instalación, y al coste del kWh habrá que añadirle otra partida correspondiente al pago de los intereses de la deuda. Se contrastan los casos de 20 y 30 años, ya que para el caso de 10 años los precios de la electricidad resultante son demasiado elevados.

Tabla 6. Precios de la electricidad con sistema de financiación para los distintos casos de estudio.

Años vida útil	Consumo específico kWh/m ³	Precio kWh (c€/kWh)			
		Zona Tordesillas	Zona Zotes	Zona Fuentes de Nava	Zona Vadocondes
20	0,2	13,95	14,72	14,38	14,32
	0,6	11,02	11,98	11,70	11,72
30	0,2	11,66	12,31	12,02	12,01
	0,6	9,06	9,84	9,62	9,64

Contrastando los precios del kWh de las tablas 5 y 6, puede observarse un incremento de entre un 22% y un 24% del coste del kWh para el caso de una vida útil de la instalación a 20 años, y de entre un 30% y un 34% para el caso de una vida útil de 30 años.

Los regantes en el territorio nacional español se acogen a la tarifa 3.1A para instalaciones de menos de 450 kW, y a la tarifa de 6 períodos en el caso de potencias superiores. En el año 2010, el precio medio del kWh para los regantes era de 8,18 c€/kWh en el caso de estar acogidos a la tarifa 3.1A, y de 7,4 c€/kWh para el caso de la tarifa de 6 períodos (Ederra et al., 2010). Durante los dos últimos años el precio de la electricidad se ha incrementado aún más, y el precio que pagan los regantes ya se aproxima a los 9 c€/kWh.

Puede observarse que el precio ya es cercano al caso de la instalación fotovoltaica para grandes consumos y con una vida útil de 30 años; mientras que para el resto de los casos el coste de la energía sería demasiado costoso. Dicho de otro modo, la viabilidad económica sólo se daría para el caso de instalaciones de energía fotovoltaica de gran tamaño, con potencia instalada por encima de los 80 kW, ya fuera porque la demanda energética de riego es alta y se necesita una gran potencia instalada, o porque se regara un gran número de hectáreas y, aunque el consumo específico de riego resultase bajo, fuera



necesaria una gran cantidad de energía. También puede observarse que la dependencia del precio respecto a las zonas de estudio no es significativa.

Sin embargo, en el caso de no incluir la financiación, el costo de la energía con energía fotovoltaica sería competitivo para sistemas de pequeño (20-30 kW) y gran tamaño con períodos de 30 años de vida útil; e incluso para sistemas de gran tamaño en períodos de 20 años de vida útil. La dotación de ayudas, en modo de créditos blandos a tipo de interés cero, ayudaría a un mayor desarrollo de este tipo de implantaciones.

Otros dos factores de gran importancia son el precio de las instalaciones fotovoltaicas y el precio de la electricidad. Como se ha mencionado con anterioridad, los precios de los módulos fotovoltaicos suponen cerca de un 40% de la inversión de la instalación. El precio del módulo fotovoltaico ha disminuido sustancialmente en los últimos años, con precios actuales de 0,8 €/Wp, frente a los precios de 2 €/Wp en el año 2008, y con vistas a seguir disminuyendo en los próximos años, por lo que bajará el precio de las instalaciones. Este factor, junto al aumento progresivo que va teniendo el precio de la electricidad en el mercado ibérico, hará que esta diferencia entre el coste del kWh producido por una instalación fotovoltaica y el precio del kWh en la red vayan acortando distancias, haciendo posibles escenarios actualmente inviables.

4. Conclusiones

La energía fotovoltaica integrada en sistemas de riego no debe ser observada como una inversión con un retorno a corto plazo, sino como una forma de energía competitiva para el riego agrario a largo plazo. Con el incremento continuo de los precios en materia energética, la aplicación del riego está empezando a ser un coste difícil de afrontar para muchas explotaciones agrarias, en un mercado globalizado donde otras zonas del planeta tienen condiciones climatológicas más favorables para los cultivos de regadío.

Si de los resultados bien puede observarse que son necesarios plazos muy largos para obtener un buen precio de la electricidad, y con instalaciones fotovoltaicas de tamaño más cercano a los 100 kW que las pequeñas, el aumento del precio de la electricidad, junto a la bajada del precio de los módulos fotovoltaicos (en los últimos 3 años el precio de los módulos ha bajado más de un 50%), pueden mejorar estos números sensiblemente en los próximos años.

Sin embargo, para ello sería necesaria una legislación favorable que permita este tipo de sistemas para el caso del riego agrícola, y no pensar en ello como una visión a corto plazo. Frente a las inversiones actuales donde se buscan retornos de pocos años, la agricultura es un sector básico donde

la modernización de las explotaciones puede revertir en una mejora a largo plazo y, en contraste con las industrias, que pueden cambiar de un lugar a otro en varios años, las tierras de cultivo son trabajadas de forma permanente a lo largo de muchos años, por lo que este tipo de iniciativas podría tener su lugar en este tipo de situaciones.

Otro aspecto a tener en cuenta es que los años con escasez de precipitaciones suelen ser los años de mayor radiación solar, por lo que se consigue una mayor hibridación entre ambos sistemas, donde la mayor producción energética del sistema fotovoltaico en años secos supliría las mayores necesidades de riego.

La inversión inicial con un retorno a largo plazo en forma de energía a bajo coste prima la productividad y la tecnificación del sector agrícola, y haría disponer de grandes superficies de regadío no dependientes de la evolución de los combustibles fósiles, aumentando la independencia externa a nivel nacional y dotando al sector de una mayor fortaleza frente al exterior. Además, el uso de fuentes de energías renovables disminuiría las emisiones de gases de efecto invernadero del sector, contribuyendo a los objetivos de reducción de emisiones del protocolo de Kyoto y haciendo una agricultura más sostenible.

Bibliografía

- Anderson, P., 2000. The role, reliability and limitations of solar photo-voltaic systems in Botswana. Ninth international conference on harmonics and quality of power. p. 973-82.
- Barlow, R., McNelis, B., Derrick, A., 1993. Solar pumping: an introduction and update on the technology, performance, costs, and economics. London: Intermediate Technology Publications Ltd.
- Bayon, E. et al., 1999. El riego de la remolacha en Castilla y León. AIMCRA.
- Cezar-de-Lima, A., Camargo-Guimarães, S., Fietz, C., Camacho, J., 2008. Flujo energético e indicadores de eficiencia en pivotes centrales de riego. *Agrociencia*, Vol. 42, Núm. 8, noviembre-diciembre, pp. 869-880. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.
- Cuadros, F., López-Rodríguez, F., Marcos, A., Coello, J., 2004. A procedure to size solarpowered irrigation (photoirrigation) schemes. *Solar Energy*; 76:465-73.
- Decimavilla, E., 1998. Las explotaciones de secano y regadío en Castilla y León: un análisis comparado de rentabilidad para el período 1980-1994. *Economía Agraria*, n.º 182 (Enero-Abril 1998) (pp. 207-238).
- Diputación de Segovia. Conclusiones generales. Auditorías energéticas en sistemas de regadío. Comunidad de regantes del Carracillo (Segovia).



- <http://www.dipsegovia.es/uploads/descargas/CONCLUSIONES_GENERALES_auditorias.pdf>; [accedido 29.05.2012].
- Ederra, I., Murugarren, N., 2010. La nueva tarifa eléctrica: la escalada de precios del agua de riego. Servicio de asesoramiento al regante. Riegos de Navarra S.A.
- NAMREP, 2006. Feasibility assessment for the replacement of diesel pumps with solar pumps, Final Report: September 2006, Ministry of Mines and Energy Barrier Removal to Namibian Renewable Energy Programme (NAMREP); 2006.
- Gómez-Limón et al., 2007. El futuro de la agricultura en Castilla y León. ITAGRA.CT
- Granda, J., 1998. Análisis comparativo del costo operativo del milímetro de riego aplicado con energía eléctrica de red o generada en el establecimiento. Economía - IPG INTA EEA Manfredi.
- Hamidat, A., Benyoucef, B., Hartani, T., 2003. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renewable Energy*; 28:1081–96.
- Mahmoud, M., 1990. Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution.
- Marouelli, W. A., Silva, W. L. C., Silva, H. R., 1994. Manejo de irrigação em hortaliças. EMBRAPA – SPI, Brasília – DF, p. 60.
- Maskey, R., Lavis, A., Qassim, A., 2007. Centre Pivots – Capital and Operating Cost Trade-off. Department of primary industries, Victoria, Australia.
- Meah, K., Ula, S., Barrett, S., 2008. Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 12:1162–75.
- Omer, A.M., 2001. Solar water pumping clean water for Sudan rural areas. *Renewable Energy*; 24:245–58.
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS); <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>>; [accedido 24.05.2012]
- Rangeley, W., 1989. Washington, D.C., comunicación personal. Área de riego de FAO Production Yearbook, 1987, Roma, 1988.
- Roul R. India's solar power - greening India's future energy demand. *ecoworld.com*, EcoWorld Inc, <<http://www.ecoworld.com/fuels/indias-solar-power.-html>>; [accedido 24.05.2012].
- Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). <<http://www.magrama.gob.es/siar/informacion.asp>> [accedido 25.05.2012]
- Tarjuelo, J.M., 2005. El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa. 581 pp.
- Waldir et al. 2000. Eficiência econômica do manejo racional da irrigação em tomateiro para processamento industrial. *Hortic. bras.*, v. 18, n. 3, nov. 2000.