

05-014

## ECONOMIC ANALYSIS OF NET-ZERO ENERGY BALANCE APPLIED TO SOLAR PUMPING FACILITIES IN AGRICULTURE

Rubio Aliaga, Alvaro<sup>(1)</sup>; Sanchez Lozano, Juan Miguel<sup>(1)</sup>; García Cascales, M<sup>a</sup> Socorro<sup>(1)</sup>; Molina-García, Angel<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidad Politécnica de Cartagena

Traditionally, international policies have promoted actions focused on reduction of emissions, energy use optimization and integration of renewables. Among the different sectors, agriculture accounts for 10% of the total EU and currently presents a relevant percentage of CO<sub>2</sub> emissions. Subsequently, it is a clear candidate to integrate sustainable proposals, as in this work, through the use of renewable resources in groundwater pumping applications. In this scenario, an economic analysis of photovoltaic use for pumping purposes along a year is proposed and assessed, comparing different configurations, sizes of installations and power demanded by the crops according to their water requirements. Nowadays, photovoltaic solar installations are mostly used only during the irrigation season, and then they offer a relevant opportunity to optimize of the energy produced in the installation itself by means of the injection and sale of the extended energy surplus throughout the natural year. The study also includes aspects that influence economic viability, such as the proximity of the electricity grid and state energy policies.

**Keywords:** *Renewables; Net zero energy balance; Rural development*

## ANÁLISIS ECONÓMICO DEL BALANCE NETO APLICADO A INSTALACIONES DE BOMBEO SOLAR EN LA AGRICULTURA

Las políticas internacionales en materia de lucha contra el cambio climático tradicionalmente se dirigen hacia actuaciones que promuevan la reducción de emisiones, la optimización en el uso de la energía, y la integración de las energías renovables. Entre los diversos sectores, la agricultura representa un 10% del total de la UE y posee actualmente un alto porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por tanto, es un claro candidato a integrar propuestas sostenibles, como en este caso, a través de la utilización de recursos renovables en el bombeo de aguas subterráneas. En este escenario, se propone un análisis económico de aprovechamiento fotovoltaico para el bombeo a lo largo de todo el año, comparando diferentes configuraciones, tamaños de instalaciones y perfiles de demanda eléctrica según el tipo de cultivo y las necesidades hídricas que presentan. Así, indicar que las instalaciones solares fotovoltaicas son utilizadas mayoritariamente sólo durante la época de riego, por lo que permiten una optimización de la energía producida y de la propia instalación mediante la inyección y venta del sobrante energético extendido a todo el año natural. El estudio incluye igualmente aspectos que influyen en la viabilidad económica, como la cercanía de la red eléctrica y las políticas energéticas estatales.

**Palabras clave:** *Renovables; Balance neto; Desarrollo rural*

Correspondencia: Angel Molina García; angel.molina@upct.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 situación global respecto del estado de la atmosfera, los cambios que se están dando en el clima y la necesidad de vigilancia de la conservación de los principales recursos naturales, así como las proyecciones crecientes de demanda de dichos recursos, pone al ámbito socioeconómico global en alerta ante el potencial riesgo del cambio climático. En este aspecto, organismos internacionales a través de acuerdos en estrategias comunes como el Protocolo de Kyoto o la Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP21 celebrada en París en 2015 (COP21, 2015), tratan de reducir los impactos del cambio climático. En este último acuerdo entre 195 países, se acordó contener el aumento de la temperatura media global, por debajo de 2°C a final del presente siglo. Para alcanzar este objetivo, se abrieron diferentes líneas de actuación que van encaminadas a la reducción de dependencia de combustibles fósiles, implantación de energías renovables (D 2009/28/CE, 2009) y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera (Boehner, 2016).

En relación al cambio en el modelo energético, éste implica la necesidad de una estrategia integrada de estudio, investigación e implantación dentro de un marco de desarrollo sostenible en todos los sectores económicos de la sociedad. Si bien, las aplicaciones para conseguir este cambio en los sectores doméstico e industrial han sido ampliamente estudiadas, aún los sectores del transporte, y más aún el de la agricultura requieren de un análisis en profundidad de las aplicaciones y de la demanda.

Por otro lado, los costes en las últimas décadas, sobre todo del silicio para uso energético, se han reducido (Bacha, 2015) haciendo competitivos los sistemas energéticos alternativos en muchas aplicaciones y propiciando una mayor implantación de dichos sistemas. Sin embargo, aún queda camino por recorrer hasta cumplir los objetivos que define la UE.

**Figura 1: Sistema de bombeo PV-solar el riego de un viñedo.**



*Fuente: Elaboración Propia.*

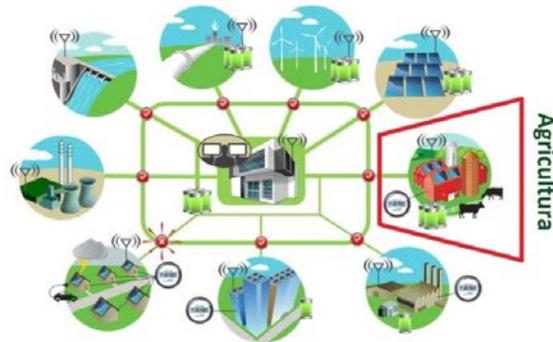
Como ya se ha dicho, la agricultura es uno de los sectores en los que las energías renovables tienen una penetración menor, ya que la inversión en el análisis de cobertura y de adaptación de sistemas ha sido menor. Sin embargo, una de las aplicaciones que ha tenido relativamente un buen acogimiento entre los agricultores, ha sido el bombeo con energía solar fotovoltaica como alternativa viable y rentable para la sustitución de los equipos electrógenos diesel (Abu-Aligh, 2011) (Glasnovic, 2007) (Foster, 2014) (Figura 1). Principalmente motivado por los altos costes de los combustibles y por unos costes de inversión fácilmente amortizables. A pesar de esto, hasta ahora el estado del arte carece de sinergias significativas entre el ámbito de estudio de la energía y el de la agricultura a excepción de algunos autores como (Meah, 2008) (Odeh, 2006) (Kelley, 2010). Esta falta de simbiosis entre las dos disciplinas ha creado un vacío académico que requiere de estudios más pormenorizados, lejos de la cobertura simple de la instalación aislada individual, que es la que se está dando actualmente.

Así, de un estudio en profundidad como el que se ha llevado a cabo previamente (Rubio Aliaga, 2017) se deriva que no solo existe una alternativa basada en energía solar para suplir la energía demandada para el bombeo de la agricultura. En esta tesitura, varios sistemas con diferentes configuraciones pueden suplir la demanda energética del bombeo con unos costes económicos menores y un mejor aprovechamiento energético de la instalación, entre ellas se han estudiado las instalaciones cooperativas (Atzeni, 2007). Entre los principales temas a tratar y uno de los criterios relacionados con este tipo de instalaciones está la necesidad de un mayor uso y aprovechamiento de la instalación, y de energía generada excedente, aquella que es generada en el periodo en el cual no se realizan labores de riego, y por tanto en sistemas aislados es energía desaprovechada. Esto es debido, a que estas instalaciones para el regadío solamente son usadas durante los meses entre mayo-septiembre, y por tanto el resto del año son infrautilizadas.

La realidad confirma que existen instalaciones sobredimensionada de bombeo solar individual, que son utilizadas entre 180-200 horas anuales. El resto de las potenciales horas de sol de las que se dispone por su ubicación, en la mayoría de los casos, no son aprovechadas. Aunque en algunos casos para parcelas de un tamaño pequeño la sectorización de la parcela y los riegos distribuidos en el tiempo, permite reducir el tamaño de la instalación energética y su coste, y aumentar su aprovechamiento en el tiempo. Por esto mismo, el aprovechamiento de estos excedentes de energía que en algunos casos pueden alcanzarse el 80-90% de la potencial energía generada por el sistema fotovoltaico de forma anual (es decir, que solo aplica entre el 10-20 % de la potencial energía generada anual), permite holgadamente un aprovechamiento alternativo importante de la energía generada. De esta forma, las instalaciones para el bombeo con energía solar conectados a la red eléctrica, son el tema sobre el que gira este artículo y son tratadas en el presente artículo, principalmente de cara a una posible venta de la energía excedente unido a la idea de las smart grids (Figura 2). En la actualidad está tomando fuerza la idea de los sistemas organizados en smart grids como un sistema de concepción a gran escala en el sistema energético nacional concebido como generación distribuida (Guerrero, 2010) (Boehner, 2016). Esta nueva organización, representa una forma de integración de desarrollos energéticos, almacenamiento energético, automatización, sistemas de medición, información y comunicación en el ámbito de generación/consumo de energía eléctrica. Permitiendo un control, una mejor y más eficiente gestión de la distribución/producción de energía, así como un uso localizado de la energía (Girbau-Llistuella, 2017) (Maheswari, 2017) (Lingfeng, 2012).

Esta forma de entender la organización de la estructura del sistema eléctrico representa un modelo óptimo para el desarrollo de las energías renovables (principalmente solar y eólica) de forma descentralizada. Una de estas configuraciones que se han estudiado en el desarrollo de este estudio, describe instalaciones conectadas a la red eléctrica. Este desarrollo y evolución de la concepción energética distribuida permite que se integre el ámbito agrícola, en las poco conocidas y poco estudiadas agro-smart grids o rural smart grids (Maheswari, 2017). Este concepto además de la energía integra también una gestión eficiente del agua, una automatización y una agricultura de precisión y equilibrio entre generación y consumo en el ámbito rural. Esta forma de conectarse a la red y obtener una retribución por la energía excedente posibilitaría ingresos directos a los agricultores y beneficios económicos en el medio rural.

**Figura 2: Smart-Grid en la que se integra el sector agrícola como productor/consumidor de energía.**



*Fuente: Texas A&M University.*

Desde el punto de vista del propietario/os de la instalación (los agricultores), además de las ventajas que pudieran derivarse de su integración en una smart grid local, se derivan una serie de ventajas económicas relacionadas con la posibilidad de venta de energía como una forma de rentabilizar la inversión realizada en la instalación solar fotovoltaica y de la construcción de la red eléctrica. diferentes porcentajes de participación, facilita que la instalación y su inversión pueda ser menor a costa de ser respaldados por la red eléctrica. Sin embargo, una de las limitaciones a estos sistemas es el del coste de la ejecución de una línea eléctrica y de los elementos auxiliares para poder transferir la energía en función de la distancia a la instalación generadora. Es por esto que aparte del análisis de la inversión en la instalación energética, y de la posible retribución de la venta de energía, se hace necesario el análisis de los costes derivados de la longitud de dicha línea.

En el caso del presente estudio, se analiza la alternativa de bombeo solar conectada a la red eléctrica, pudiendo verter la energía excedentaria. Esta alternativa está basada en la principal premisa de aprovechar la energía sobrante de los sistemas de regadío por bombeo solar fotovoltaico durante el resto del año que no es utilizada. Ahora bien, en algunos países han promovido el autoconsumo y tienen un porcentaje de implantación de estos sistemas mucho mayor al existente en España, aun disponiendo en la Península Ibérica de un mayor potencial solar (Francia 1.000 MW, España 22MW, Reino Unido 2.300 MW o Alemania 2.000 MW). Por otro lado España, tampoco cuenta con una regulación ventajosa para la implantación del balance neto como en países como Bélgica o Dinamarca (Romero Rubio, 2014).

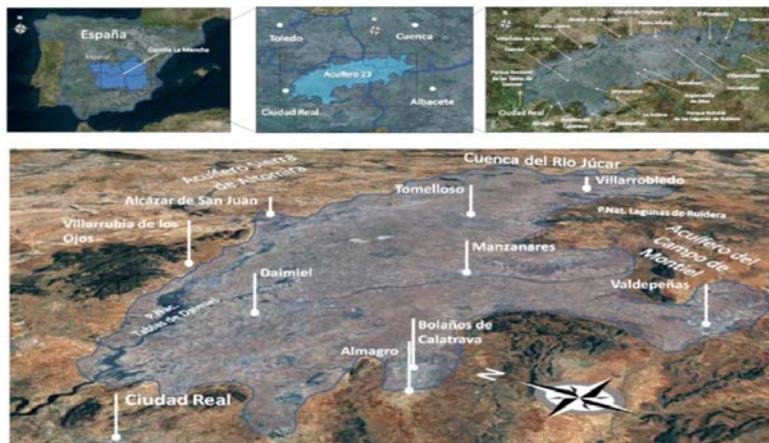
Tras una larga serie de modificaciones en el plano normativo y jurídico de las instalaciones de energías renovables en España (RD1699/2011, RDL 1/2012, L15/2012, OM 1491/2013, RD413/2014) la regulación de instalaciones de autoconsumo a través del Real Decreto 900/2015 (RD900/2015, 2015), existen una serie de impuestos que deben pagar las instalaciones que se encuentren conectadas a la red en el momento que quieran verter energía a la red eléctrica. Y por ello, es importante entender la situación actual situación del autoconsumo para proponer sistemas agro-energéticos conectados a la red. Aunque a principios de 2018, se está viendo como la reducción de costes y la proliferación de dichos sistemas está haciendo que el autoconsumo sea rentable en España pese a los impuestos y peajes que se le han interpuesto. En resumen, se hace necesario un estudio pormenorizado de la integración de los recursos energéticos renovables en la agricultura de bombeo, pero a su vez también la integración conjunta con la red eléctrica con el objetivo claro de aprovechar el excedente de energía. Sin embargo, la barrera que representa la legislación vigente puede hacer más o menos rentable la conexión.

El desarrollo de este artículo se estructura de la siguiente forma: primeramente se describirá el caso de estudio, seguido de una descripción de la metodología utilizada. Más tarde, los resultados con las gráficas en las que se muestra la energía excedente y los potenciales beneficios económicos de la venta de energía. Finalmente se muestran las conclusiones.

## 2. Caso de estudio

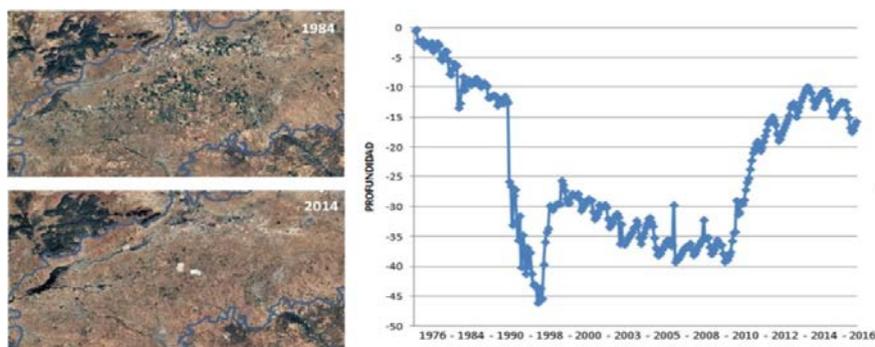
El presente estudio ha tomado como caso de estudio el Acuífero 23 de Castilla La Mancha (España) (Figura 3) sobre el cual se ha aplicado la metodología descrita. La naturaleza de dicha metodología permite abordar de manera general toda su área. El área donde se ubica este acuífero es una cuenca sedimentaria inmersa en un sistema kárstico. Se trata de un acuífero que varía en su profundidad entre los 10 y los 70 metros, ocupando una extensión de 5.500 km<sup>2</sup>. Éste, es un acuífero sobreexplotado, representativo de una mala gestión, de la falta de control ambiental e hídrico, y de una nula planificación de extracciones que lo llevó a su sobreexplotación alcanzando bajadas de 2,3 m/año (Instituto Geológico y Minero de España, IGME, 2004) durante los años de mayores extracciones. Pero al mismo tiempo, es un ejemplo, de su parcial recuperación (Figura 4). En la actualidad, pese a su estado medio-bueno, este acuífero sigue estando declarado sobreexplotado, debido a su fragilidad y a la rápida influencia de cualquier explotación por encima de su régimen natural. Esta recuperación es debida a que se está tomado conciencia de la situación y del deber de mantener los recursos hídricos ya que estos no son infinitos, y como de su continuidad dependen el mantenimiento de la economía del agricultor (Moreno, 2012).

**Figura 3: Capa de situación de la zona de estudio y del acuífero.**



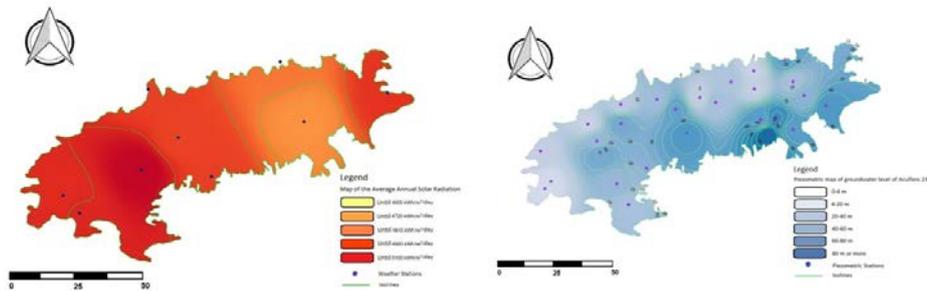
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 4: Imagen satelital del régimen de explotación de los recursos hídricos y perfil cronológico de los piezómetros**



Fuente: Elaboración Propia a través de imágenes de Google Earth y datos de CHG.

**Figura 5: Capas de descripción del recurso solar y de profundidad del nivel freático del acuífero.**



Fuente: *Elaboración Propia.*

En cuanto a su clima, éste se describe como un clima mediterráneo continentalizado con presencia de veranos secos y calurosos con elevada insolación, e inviernos fríos con un periodo de heladas. Por el contrario, tanto las primaveras como los otoños se caracterizan por ser suaves y húmedos (Pérez González, 1998). Uno de los factores determinantes son las precipitaciones anuales, las cuales en la zona de estudio son variables oscilando entre periodos más húmedos y periodos más secos, situándose en torno a los 350-400 mm anuales. No obstante, el recurso importante para el desarrollo de este tipo de sistemas es el recurso solar, y es por esto que la zona de estudio cuenta con un alto potencial de horas de sol, concretamente 4.900 horas de sol anuales (Figura 5). Sin embargo, con las condiciones que viene imponiendo el cambio climático en las últimas décadas, las temperaturas medias anuales están aumentando levemente, mientras que las precipitaciones se están viendo reducidas, poniendo en grave riesgo de desertificación la zona de estudio.

En cuanto a la agricultura, la zona agrícola superpuesta a dicho acuífero, es representativa de la agricultura manchega y mediterránea: trigo, olivar, y vid. En esta zona, el regadío de aguas subterráneas, se centra en dotar de agua a la vid, aunque también y en menor porcentaje a los herbáceos. Como se aprecia, regadío es uno de los principales motores económicos y sustento de la sociedad rural de dicha zona de estudio (Sanz, 1999).

Desde un punto de vista global, el sector agrícola en esta zona sufre una intensa dependencia de los combustibles fósiles debido a que esta agricultura se abastece actualmente a través de equipos electrógenos diesel. Y por tanto, una bajada del nivel freático no hace más que requerir aún más energía, y por ende, más recursos económicos para elevar el agua desde una mayor profundidad (Corominas, 2010). A esto se añaden los precios volátiles del mercado de los derivados del petróleo, haciendo que el coste de producción de alimentos se vea alterado al alza, sin que los agricultores puedan hacer otra cosa que reducir su margen ganancial. Afectando también a la competitividad de los productos en caso de optar por subir los precios. Por tanto, no solo ya el cambio de modelo energético es beneficioso para esta zona de estudio, sino que también la posibilidad de percibir ingresos extra por la venta de la energía que no se está aprovechando es un modelo muy atractivo para esta economía rural.

No menos importante son las potenciales emisiones de CO<sub>2</sub> que podrían reducirse, en el cambio de modelo energético. De esta forma, las emisiones generadas por los equipos diesel, que representan la mayoría indiscutible entre las explotaciones de regadío de aguas subterráneas, son reducidas por la implantación de sistemas energéticos renovables, prácticamente de emisiones nulas como son los sistemas propuestos en este estudio. Además, el hecho que un sistema con emisiones tan reducidas en su ciclo de vida pueda inyectar energía en la red, contribuye a que la media de emisiones asociadas a la red eléctrica y a la generación eléctrica del país baje proporcionalmente. En este escenario, se pretende analizar la energía excedente anual del sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica. Con la intención de valorarlo y cuantificarlo con el fin que puedan verse beneficiadas las

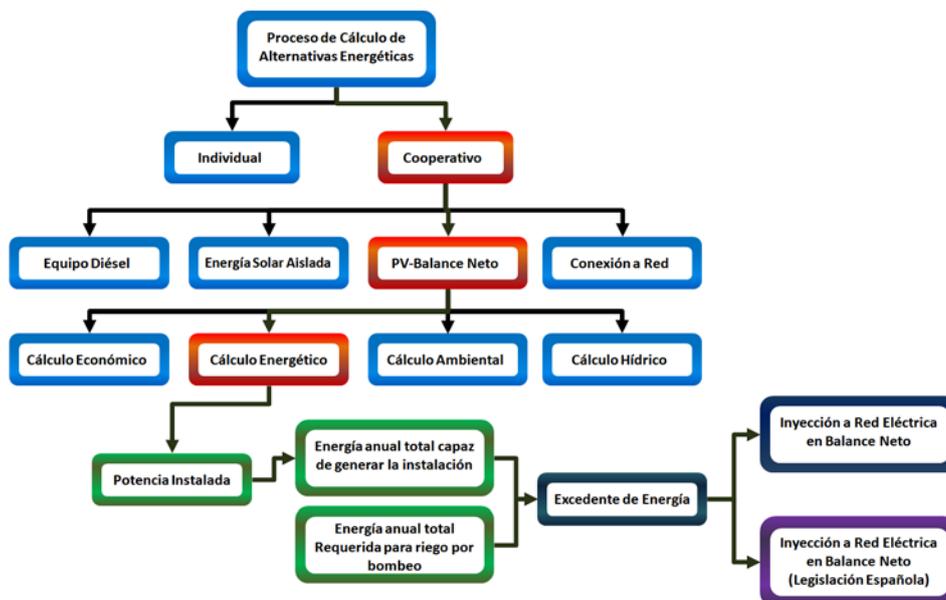
instalaciones mediante las retribuciones por la venta de energía. Estudiando el potencial económico resultante y sus costes derivados.

### 3. Metodología

La metodología que se ha desarrollado, es descrita por un proceso en el cual el objetivo era caracterizar las alternativas energéticas a la hora de suministrar energía a la labor agrícola del riego mediante aguas subterráneas. Además ofreciendo diferentes alternativas o soluciones, entre ellas algunas basadas en fuentes de energía renovable, tal como se indica en la Figura 7. Este proceso de caracterización de alternativas estaba basado primeramente en la creación de una base de datos físicos de la zona de estudio, de las demandas energéticas de la agricultura de regadío y del funcionamiento propio de las instalaciones. Tras ello, se procedía a la generación de alternativas teniendo en cuenta diferentes variables y opciones de configuración: instalación aislada frente a instalación con respaldo de la red eléctrica, instalación de bombeo con acumulación o bombeo directo, suministro energético con equipos diésel, con energía solar fotovoltaica o abastecido a través de la red eléctrica, instalación individual o cooperativa, entre otras opciones. Tras ello se realizó un cálculo multidimensional de cada una de las alternativas ya que estas configuraciones están definidas en base a varios criterios hídricos, energéticos, sociales, económicos y ambientales.

En este trabajo se va profundizar solamente en las instalaciones cooperativas que abastecen la demanda del bombeo con energía solar fotovoltaica pero que se encuentran conectadas a la red eléctrica, y dentro de este grupo aquellas alternativas que suponen la instalación de bombeo directo. Como se aprecia en la Figura 7, el punto de partida por tanto, son los datos resultantes de los cálculos energéticos de los sistemas propuestos referentes a la energía solar fotovoltaica conectados a la red eléctrica, es decir, los resultados del dimensionamiento de la instalación atendiendo a la demanda energética en el uso del regadío. El siguiente paso es analizar la demanda mensual de energía y sustraerla de la energía generada con la configuración determinada. De esta forma, el excedente de energía es hallado de forma mensual en los sistemas fotovoltaicos de bombeo.

Figura 7: Metodología general y desglosada para el análisis del excedente de energía.

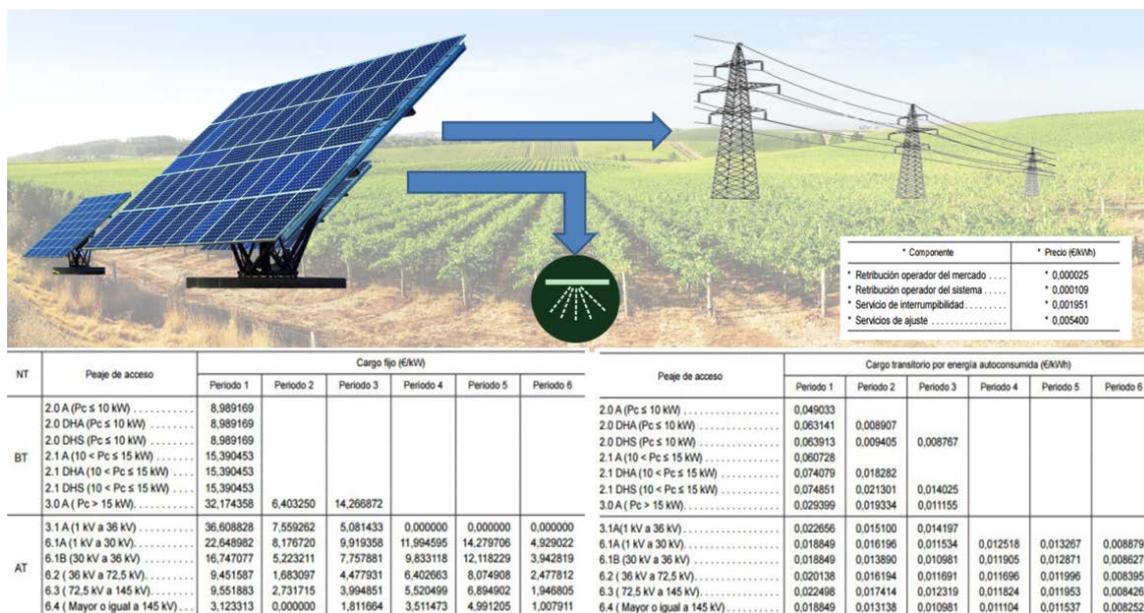


Fuente: Elaboración Propia.

El paso siguiente es aplicar las normas y requisitos para poder verter la energía excedentaria a la red eléctrica alcanzando los datos económicos de una posible retribución económica. En este punto, como ya se ha avanzado en la introducción se diferencia, por un lado, el balance neto puro aplicando los precios del pool del mercado eléctrico, y el autoconsumo definido en la legislación española en el RD 900/2015. A través de este Real Decreto se establecen dos tipos de autoconsumo. Por un lado el autoconsumo Tipo 1, hasta los 100 kW de potencia contratada en la que entrarían la mayor parte de instalaciones individuales de riego por bombeo. Sin embargo, según dicho Real Decreto, la energía excedentaria del Tipo 1 es vertida, no recibiendo ninguna remuneración o contraprestación por ello los agricultores. Y el autoconsumo Tipo 2, sin límite de potencia, retribuyendo la energía vertida al precio en que se encuentre la electricidad en el pool del mercado eléctrico. Las comunidades de regantes de bombeo solar estarían en el Tipo 2. Ahora bien, en España deben hacer frente a una serie de impuestos que se serían sustraídos al precio de la energía que se ha generado. Lo cual, representa lastre a la hora de incentivar la implantación la solar en este caso, causando que las instalaciones conectadas a la red no puedan amortizarse en un plazo menor de tiempo.

Los costes son los siguientes, por un lado el componente de cargos variables asociados a los costes del sistema, calculados a partir de los términos variables. El componente de pagos por capacidad para compensar el respaldo del sistema. La retribución a los operadores del mercado y del sistema, el servicio de interrumpibilidad y el servicio de ajuste, tal como se muestra en las siguientes tablas (Figura 8).

**Figura 8: Metodología general y desglosada para el análisis del excedente de energía.**



Fuente: Elaboración Propia.

Aunque, por regla general, los periodos para potencias reducidas se distribuyen en tres periodos, para potencias superiores a 450 kW las tarifas eléctricas ofrecen 6 periodos horarios. Para los sistemas descritos en este estudio (bombeo solar directo), el periodo más habitual para este tipo de instalaciones son: si se diera el caso para Mayo: P5, en Junio: P3-P4, el resto de Junio y Julio: P1, en Agosto: P6, no siendo habitual el riego en Septiembre, pero sería encuadrado en los periodos P3-P4 (Figura 9).

**Figura 9: Metodología general y desglosada para el análisis del excedente de energía.**

Horas	0-8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	P6	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2
Febrero	P6	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2
Marzo	P6	P4	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P4	P4							
Abril	P6	P5															
Mayo	P6	P5															
1-15 Junio	P6	P4	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P4								
16-30 Junio	P6	P2	P2	P2	P1	P2	P2	P2	P2	P2							
Julio	P6	P2	P2	P2	P1	P2	P2	P2	P2	P2							
Agosto	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
Septiembre	P6	P4	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P4								
Octubre	P6	P5															
Noviembre	P6	P4	P3	P3	P3	P3	P3	P3	P4	P4							
Diciembre	P6	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P2	P2	P1	P1	P1	P2	P2	P2

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4. Resultados

El modelo aquí analizado es fácilmente reproducible y escalable para cualquier parte del mundo y para cualquier condicionante. Puesto que son muchas alternativas y configuraciones para instalaciones de bombeo. Es por esto, que este artículo se ha enfocado a los sistemas de bombeo directo y no en los bombeos con acumulación, ya que requieren de una instalación de mayor potencia, y por ende, con un mayor índice de generación de energía. Del mismo modo, las configuraciones elegidas están compuestas por módulos fotovoltaicos fabricados con tecnología PV de monosilicio, en una instalación fija. También las instalaciones que se han representado son de instalaciones configuradas en cooperativa de 1 a 2.000 hectáreas. Ya que, el coste de conexión a un punto común del área agrícola, tiene un coste menor que una red mucho más dispersa para conexiones individuales. Puesto que en la zona del caso de estudio, la mayoría de los cultivos (viñedo principalmente) que se dan, tienen demandas hídricas entre los 1.500 m<sup>3</sup>/ha y los 3.000 m<sup>3</sup>/ha, para un bombeo comprendido entre los 10 y 55 metros de profundidad, se han analizado solamente las demandas en los rangos mencionados.

##### a) Energía sobrante

Se constata que depende del manejo agronómico de la parcela, de la dotación hídrica que demanda la parcela, de las precipitaciones y del estado del suelo, que la energía requerida variará en tiempo. Sin embargo, un sistema ubicado en el lugar del caso de estudio contará por regla general los riegos concentrados en los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre. Lo cual hace que las instalaciones de bombeo, se encuentren infrautilizadas desde la época inmediatamente posterior a la temporada de recolección hasta los meses de floración-maduración de los cultivos (Mayo-Junio) al año siguiente. De esta forma, con la intención de cuantificar la energía no aprovechada, se han elaborado las siguientes gráficas, donde se aprecian el gradiente de las variables estudiadas (energía excedentaria y retribución económica). Estas gráficas, se presentan en función de varios factores. Por un lado, según el tamaño del área que se va a concentrar en hectáreas, que influye directamente en el tamaño de la instalación que va a abastecer dicha extensión. Por otro lado, según la profundidad a la que se encuentre el agua para cultivos. Y por último para una determinada demanda hídrica.

En esta primera gráfica, para demandas hídricas de 1500 m<sup>3</sup>/ha (dotación habitual del viñedo), la energía sobrante anual para una misma superficie se observa es mayor cuanto mayor es la profundidad desde la que tiene que bombear (Figura 10).

De igual forma, para una mayor demanda de agua 3.000 m<sup>3</sup>/ha, lo que puede significar consumos para cultivos herbáceos de baja demanda hídrica o para un mosaico de cultivos de herbáceos y viñedo, la energía no aprovechada en las instalaciones de bombeo es aún mayor, también en función de la profundidad. Esto es debido, a que tanto la profundidad como la necesidad hídrica influye directamente en el cálculo de la instalación solar de bombeo, por tanto cuanto mayor sea la instalación, mayor será la energía capaz de generar como se muestra en la Figura 11.

*b) Retribución por inyección del excedente de energía de los sistemas fotovoltaicos de bombeo en balance neto puro*

Si el sistema estuviese enmarcado por una legislación favorable y libre de impuestos a la generación energética, es decir en balance neto puro, la retribución directa de la venta de energía excedente se muestra en las siguientes figuras (Figura 12) (Figura 13).

*c) Retribución por inyección del excedente de energía de los sistemas fotovoltaicos de bombeo en autoconsumo con legislación española.*

En las siguientes tablas se muestran de igual forma, la retribución económica de las instalaciones aplicando la legislación española al efecto (Figura 14) (Figura 15). Con la legislación definida en el RD900/2015, y la aplicación de los impuestos y cargos que en él se establecen, la retribución económica de las instalaciones analizadas se ven reducidas tanto para dotaciones de 1.500m<sup>3</sup>/ha como 3.000 m<sup>3</sup>/ha, respecto de las instalaciones en balance neto puro.

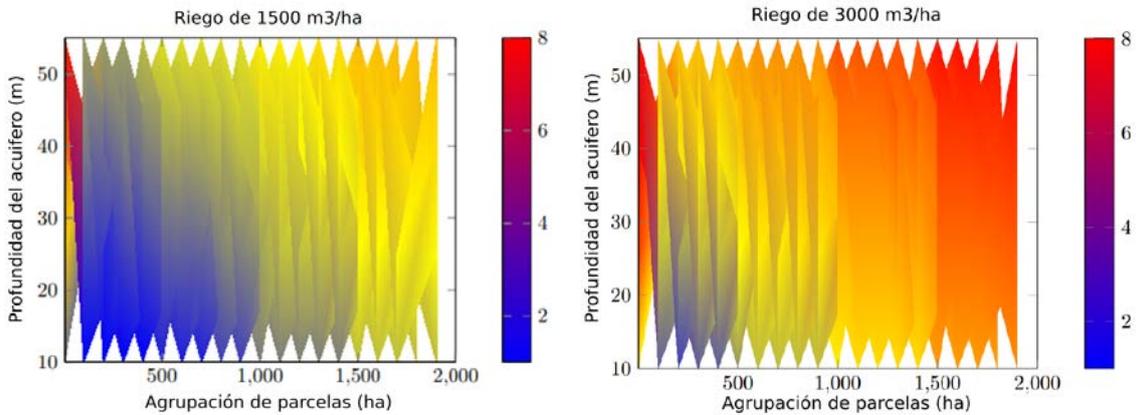
El análisis de los resultados y la comparativa entre la retribución económica de la energía sobrante para 1500 m<sup>3</sup>/ha y para 3000 m<sup>3</sup>/ha, con una legislación proclive al desarrollo de las energías renovables y el sistema español definido por el RD 900/2015, es que tal que en términos generales es posible recibir entre un 40-60% de retribución económica por la venta de energía con la aplicación del RD 900/2015 del que se obtiene con una legislación favorable. Ahora bien, un sistema para 3.000 m<sup>3</sup>/ha permite aprovechar entre 1,6 y 1,8 veces más energía excedentaria, y por tanto, de retribución económica, que un sistema para 1.500 m<sup>3</sup>/ha.

Por tanto, se constata que las instalaciones solares para el bombeo de aguas subterráneas, por un lado, pueden aprovecharse mejor. Y por otro lado, con una conexión a la red eléctrica, permiten recibir unos ingresos importantes como beneficios económicos que permiten rentabilizar la instalación mucho antes o tener una segunda vía de ingresos en esta agricultura.

## **5. Conclusiones**

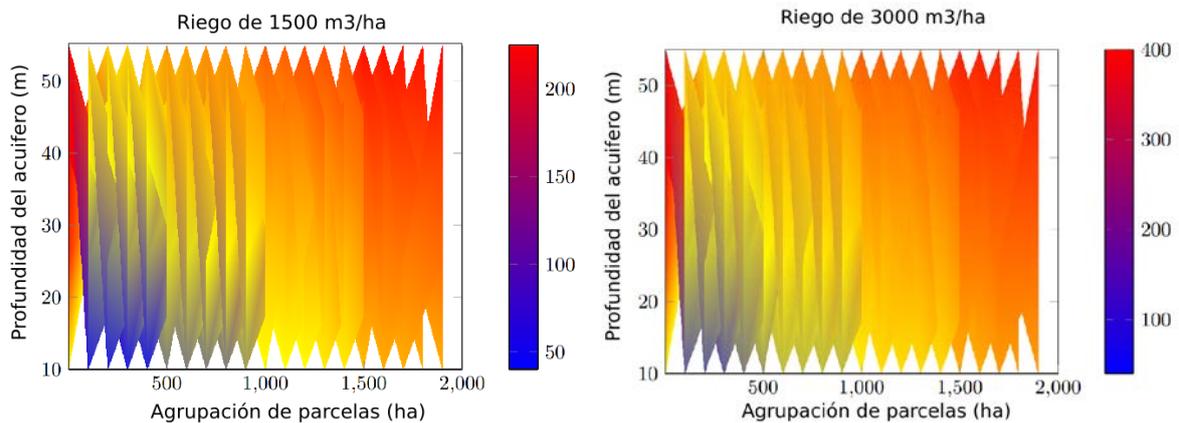
Lo que se deriva de este estudio es la posibilidad de implantar sistemas energéticos renovables conectados a la red eléctrica en la agricultura, formando rural smart grids. Esto es debido a que, tras el cambio del modelo energético en los bombeos hacia sistemas con energía solar fotovoltaica, existe una importante cantidad de energía generada y no aprovechada a lo largo del año. Sin embargo, cabe la necesidad de analizar en profundidad la rentabilidad de la inversión en la propia instalación energética, respecto de la inversión en la construcción de la línea eléctrica.

**Figura 10-11: Excedente de energía anual de los sistemas fotovoltaicos de bombeo de aguas subterráneas (MWh) para necesidades de riego de 1.500 m<sup>3</sup>/ha y de 3.000 m<sup>3</sup>/ha.**



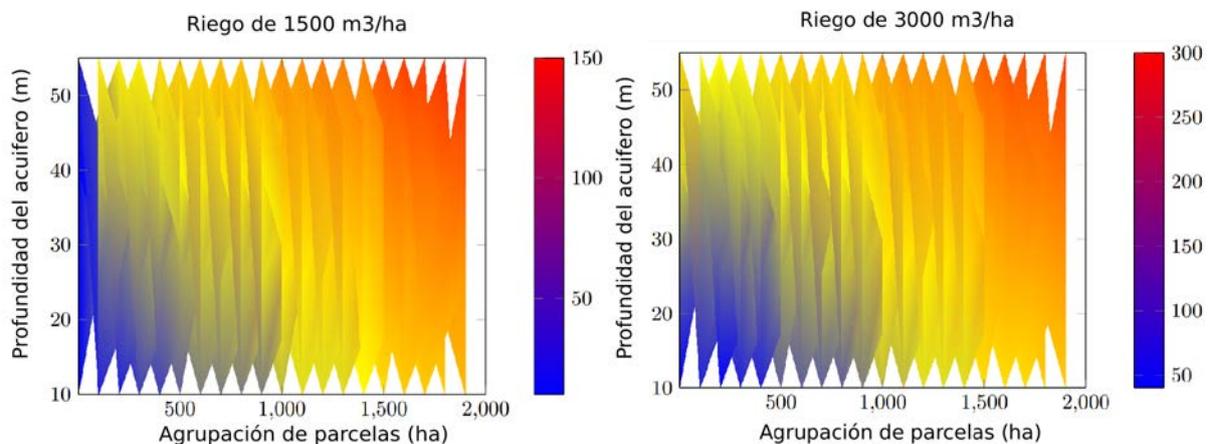
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 12-13: Retribución por inyección del excedente de energía de los sistemas fotovoltaicos de bombeo de aguas subterráneas a la red eléctrica en balance neto puro (€) para necesidades de riego de 1.500 m<sup>3</sup>/ha y de 3.000 m<sup>3</sup>/ha.**



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 14-15: Retribución por inyección del excedente de energía de los sistemas fotovoltaicos de bombeo de aguas subterráneas a la red eléctrica en autoconsumo con la legislación española puro (€) para necesidades de riego de 1.500 m<sup>3</sup>/ha y de 3.000 m<sup>3</sup>/ha.**



Fuente: Elaboración Propia.

Como se aprecia, la legislación que determine la conexión, y el formato de inyección a la red eléctrica, autoconsumo o balance neto, hace que las condiciones económicas se vean alteradas y modifiquen la rentabilidad de la instalación y de la conexión. La actual legislación española no crea una seguridad jurídica al sector, para invertir en sistemas conectados.

Finalmente este estudio representa, una forma de unir la agricultura y la energía sin que ello requiera que uno de los sectores desplace al otro, un solapamiento agro-energético sano que además permite generar importantes beneficios al sector. Así, un sector muy castigado principalmente por los precios de producción y los altos costes y dependencia de los combustibles fósiles, puede asociarse con el sector energético para verse beneficiado al vender energía como subproducto o como una segunda actividad complementando sus ingresos y creando una simbiosis entre ambos sectores.

## 6. Bibliografía

- Abu-Aligah, M. (2011). Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare it with Diesel Powered Pump. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 5(3).
- Alstone, P., Gershenson, D., & Kammen, D. M. (2015). Decentralized energy systems for clean electricity access. *Nature Climate Change*, 5(4), 305.
- Atzeni, I., Ordóñez, L. G., Scutari, G., Palomar, D. P., & Fonollosa, J. R. (2013). Noncooperative and Cooperative Optimization of Distributed Energy Generation and Storage in the Demand-Side of the Smart Grid. *IEEE Trans. Signal Processing*, 61(10), 2454-2472.
- Bacha, S., Picault, D., Burger, B., Etxeberria-Otadui, I., & Martins, J. (2015). Photovoltaics in microgrids: An overview of grid integration and energy management aspects. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 9(1), 33-46.
- Boehner, V., Franz, P., Hanson, J., Gallart, R., Martínez, S., Sumper, A., & Girbau-Llistuella, F. (2016). Smart grids for rural conditions and e-mobility-Applying power routers, batteries and virtual power plants. In *Actas CIGRE 2016* (pp. 1-9).
- Conferencia sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas, *Conferencia de las Partes, 21er periodo de sesiones*. Aprobación del acuerdo de París, 2015.
- Corominas, J. (2010). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del agua*, 17(3), 219-233.
- Directiva 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de las Comunidades Europeas (140/16).
- Foster, R., & Cota, A. (2014). Solar water pumping advances and comparative economics. *Energy Procedia*, 57, 1431-1436.
- Girbau-Llistuella, F., Sumper, A., Díaz-González, F., Sudrià-Andreu, A., & Gallart-Fernández, R. (2017, June). Local performance of the smart rural grid through the local energy management system. In *Modern Power Systems (MPS), 2017 International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Glasnovic, Z., & Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar energy*, 81(7), 904-916.
- Guerrero, J. M., Blaabjerg, F., Zhelev, T., Hemmes, K., Monmasson, E., Jemei, S., ... & Frau, J. I. (2010). Distributed generation: Toward a new energy paradigm. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1), 52-64.
- 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(9), 2669-2682.

- Lingfeng, K., Wanxing, S., Jinyu, W., Ying, L., & Qipeng, S. (2012, September). Evaluation on the application mode of distributed generation. In *Electricity Distribution (CICED), 2012 China International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Maheshwari, Z., & Ramakumar, R. (2017). Smart Integrated Renewable Energy Systems (SIREs): A Novel Approach for Sustainable Development. *Energies*, 10(8), 1145.
- Meah, K., Ula, S., & Barrett, S. (2008). Solar photovoltaic water pumping—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1162-1175.
- Moreno, M. M., Gutiérrez, J. L., & Cortina, L. M. (2012). Características hidrogeológicas y evolución piezométrica de la Mancha Occidental. Influencia del periodo húmedo 2009-2011. *Boletín geológico y minero*, 123(2), 91-108.
- Odeh, I., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2006). Economic viability of photovoltaic water pumping systems. *Solar energy*, 80(7), 850-860.
- Pérez González, M. (1998). Clima y microclima de la Mancha Húmeda. In *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* (No. 18, pp. 239-239).
- Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo., *Boletín Oficial del Estado BOE* (243). Ministerio de Industria.
- Romero Rubio, C., & Andres Diaz, J. R. (2014). Spanish electrical system: Effect of energy reform in the development of distributed generation. In *18th International Congress on Project Engineering*.
- Rubio-Aliaga, Á., García-Cascales, M. S., Molina-García, Á., & Sánchez-Lozano, J. M. (2017). Geographic Information System for Optimization and Integration of Photovoltaic Solar Energy in Agricultural Areas with Energy Deficiency and Water Scarcity. In *Project Management and Engineering Research* (pp. 181-197). Springer, Cham.
- Sanz, G. L. (1999). Irrigated agriculture in the Guadiana River high basin (Castilla-La Mancha, Spain): environmental and socioeconomic impacts1. *Agricultural Water Management*, 40(2-3), 171-181.