

## **SELF ENERGY PRODUCTION BY A FLOATING PHOTOVOLTAIC SYSTEM COVER FOR IRRIGATION RESERVOIRS.**

Redón Santafé, M.I.<sup>1</sup>; Ferrer Gisbert, P. S.<sup>2</sup>; Ferrer Gisbert, C.M.<sup>1</sup>; Ferrán Gozávez, J.<sup>1</sup>; Torregrosa Soler, J.B.<sup>1</sup>; Sánchez Romero, F. J.<sup>1</sup>; Pons Puig, E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Ing. Rural y Agroalimentaria. UPV, <sup>2</sup> Dpto. Proyectos de Ingeniería. UPV, <sup>3</sup> Isigenere S.L.

This paper studies the technical and economic viability of using photovoltaic energy generated by a photovoltaic floating cover system (CFFV). Therefore, a pumping system of a water supply network will use the renewable energy instead of using the traditional sources of energy. The case study is exemplified into a real situation, the irrigation community named "C.R. Virgen de las Nieves de Aspe" (Alicante). This community has a drip irrigation sector covering an irrigated area of 330 Ha which uses a pumping system to achieve the conditions of pressure and flow needed.

Firstly, the paper studies the current hydraulic and power situation. Then, the conceptual design of the CFFV is performed assessing the green energy produced. Since the production of renewable energy is greater than the irrigation energy needs, several solutions combining self-consumption and exporting the electricity back to the grid are proposed. Finally, an economic study is performed confirming the viability of the photovoltaic covering. Furthermore, the technical solutions are flexible to the extent that the installation can be performed into gradual steps according to the power needs and the affordable investment.

**Keywords:** *Photovoltaic floating cover; Self consumption; Irrigation pumping facilities*

## **PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PARA AUTOCONSUMO MEDIANTE UN SISTEMA DE CUBIERTA FLOTANTE FOTOVOLTAICA PARA BALSAS DE RIEGO.**

El presente artículo estudia la viabilidad técnica y económica de utilización de la energía fotovoltaica generada por un sistema de cobertura flotante fotovoltaico (CFFV) para autoconsumo de la propia red de riego en sus grupos de bombeo. El estudio se ejemplifica a la situación real de un sector de riego mediante inyección directa de la C.R. Virgen de las Nieves de Aspe (Alicante) que cubre una superficie regable de 330 Ha.

En primer lugar, se realiza un análisis hidráulico y energético de la situación actual. Seguidamente, se realiza el diseño conceptual y fotovoltaico de la CFFV para analizar la viabilidad de utilización de la energía generada. Así, se obtiene que el potencial de energía generada por la CFFV es superior a las necesidades de la red de riego. Finalmente, se proponen situaciones mixtas de vertido a red y autoconsumo que dan lugar a diferentes escenarios económicos que confirman la viabilidad de la cobertura fotovoltaica. Además, las soluciones son flexibles en la medida que permiten la instalación gradual sobre la lámina de agua según las necesidades energéticas a cubrir y la inversión asumible.

**Palabras clave:** *Cubierta flotante fotovoltaica; Autoconsumo; Instalaciones de bombeo para regadío*

Correspondencia: miresan@agf.upv.es

## 1. Introducción

Los denominados bombeos solares constituyen una práctica habitual a partir del desarrollo de la tecnología fotovoltaica, que se ha visto favorecida por la concienciación de la sociedad sobre el interés medioambiental de las energías renovables (Castro Gil et al, 2011). Pero uno de los principales inconvenientes que presenta es la estacionalidad inherente al riego que alarga los períodos de amortización de dichas instalaciones. Frente a este hecho, la posibilidad de vender la energía producida durante los períodos de inactividad se presenta como una vía prometedora para el desarrollo de estas instalaciones.

Por otra parte, la supresión de las primas a las instalaciones fotovoltaicas ha despertado un gran interés por la opción del autoconsumo entre instaladores y promotores. Aunque la legislación que regula este tipo de instalaciones se encuentra en la actualidad muy dispersa y la sociedad ansía una regulación del denominado “balance neto” de compensación de saldos de energía, el marco normativo actual ampara las instalaciones de autoconsumo total o parcial de la energía (IDAE, 2011).

Bajo estas dos premisas -el riego solar y el autoconsumo- se plantea el estudio de la viabilidad técnica y económica de un sistema de cubrición flotante fotovoltaico (CFFV), empleando la energía producida para el autoconsumo parcial en los grupos de bombeo de una red de riego.

Dicho sistema fue concebido para simultanear las ventajas de la cubrición de balsas con el vertido de la energía producida a la red, cuando las primas existentes desincentivaban económicamente la alternativa del autoconsumo. Una descripción del mismo fue presentada en la pasada edición del Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos de AEIPRO (Ferrán et al, 2012). En la presente ponencia se estudia la viabilidad de dicho sistema desde la perspectiva del autoconsumo al igual que se describen algunas mejoras incorporadas en el diseño del mismo.

## 2. Metodología

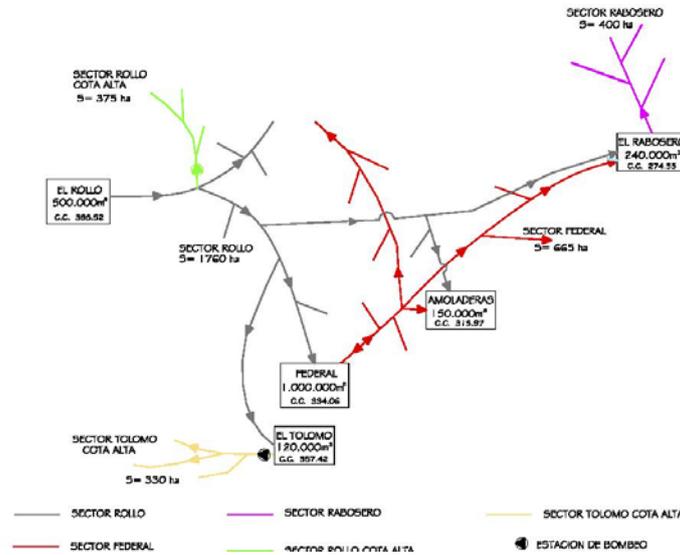
Para analizar la viabilidad de utilizar la energía generada por la CFFV como fuente de suministro de un conjunto de bombas para una red de riego comunitaria, se propone un esquema de trabajo que se fundamenta en las siguientes cuestiones:

- Descripción de la situación actual de la red de riego objeto de estudio.
- Desarrollo técnico del sistema de cubrición.
- Determinación de las variables hidráulicas y energéticas principales en la situación actual de la red de riego.
- Determinación de las variables hidráulicas y energéticas en la situación de generación propia de la energía gracias a la CFFV.
- Comparación de costes energéticos entre ambas situaciones.

### 2.1. Caso de estudio

La Comunidad de Regantes Virgen de las Nieves de Aspe (Alicante, España) tiene una superficie de regadío de unas 3.520 hectáreas. En los últimos años, y gracias a los planes de modernización de regadíos tanto de ámbito estatal como autonómico, se han realizado las obras de puesta en riego por goteo a la demanda del total de su superficie regable.

**Figura 1: Esquema hidráulico de la Red de Riego de la C.R. Virgen de las Nieves**



El esquema hidráulico principal de la red de riego atiende a cinco sectores independientes de riego (figura 1): i) tres sectores se riegan por gravedad desde balsas de cabecera con suficiente cota (Sectores “Rollo”, “Federal”, “Rabosero”); ii) y los dos sectores restantes, que no se dominan por gravedad desde las balsas existentes, mediante el auxilio de grupos de bombeo de inyección directa en la red (Sector “Tolomo Cota Alta” y “Rollo Cota Alta”).

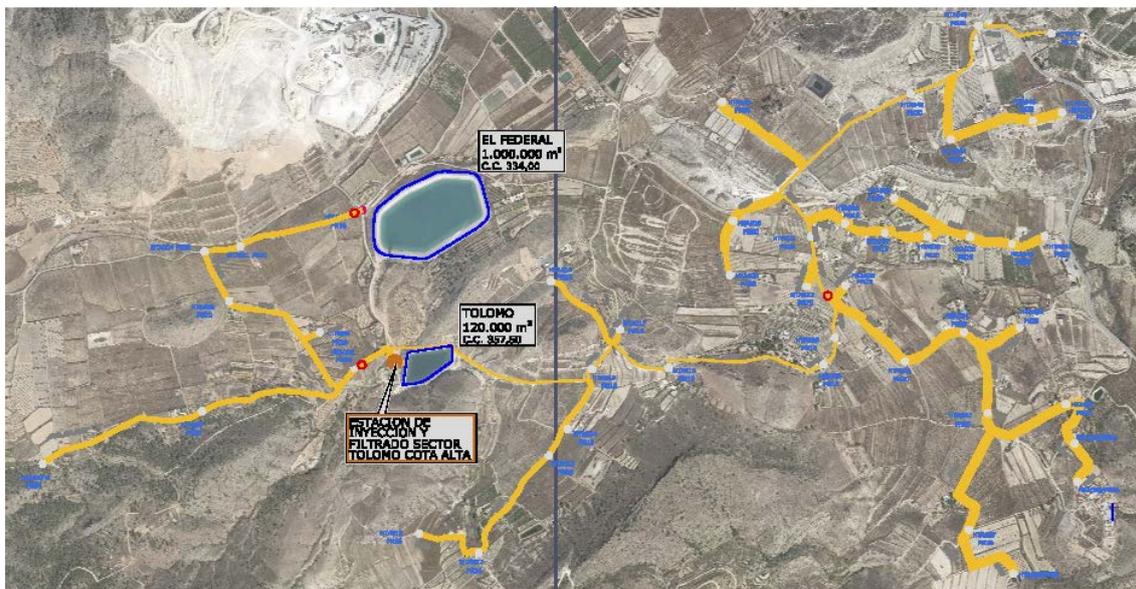
El análisis de cada uno de los sectores se realiza a la demanda, siguiendo el modelo de cálculo de caudales de Clement (Bonnal, 1971). La red se ha diseñado mediante un sistema de hidrantes multiusuario. En cada uno de estos hidrantes se garantiza una presión igual o superior a 30 mca y se disponen salidas hacia cada una de las parcelas de los usuarios.

El caso particular en estudio (sector “Tolomo Cota Alta”) se alimenta desde la Balsa “El Tolomo”. La tabla 1 y la figura 2 resumen sus características principales.

**Tabla 1: Características principales sector de riego “Tolomo”**

<b>Red de riego</b>	
Abastecimiento desde balsa “El Tolomo” mediante estación de inyección y filtrado instalada junta a la propia balsa	
Superficie de Riego	330 Ha
Total de hidrantes multiusuario	49
Rango de presiones aportado por las bombas	60 – 90 mca
Rango de caudales	0 – 345 l/s
Grupo de inyección	3 electrobombas con variador
<b>Balsa “El Tolomo”</b>	
Tipología	Balsa materiales sueltos impermeabilizada con geomembrana
Cota de coronación	357 msnm
Cota de fondo	340 msnm
Profundidad balsa	12 m
Pendiente Talud interior	2.2 H/1V
Capacidad balsa	122.000 m <sup>3</sup>
Superficie de coronación	16.300 m <sup>2</sup>

**Figura 2: Esquema sector riego “Tolomo Cota Alta”**



## 2.2. Desarrollo técnico del sistema de cubrición (CFFV)

La CFFV consiste en la creación de una superficie flotante sobre la lámina de agua con unidades flotantes de polietileno que albergan un único panel FV. Dicha modificación conceptual es el elemento diferenciador primordial del diseño de la presente comunicación respecto a la materialización expuesta en Ferrán et al. (2012). Los flotadores de polietileno tienen unas dimensiones de 1,850 x 1,200 x 250 mm, para inclinaciones de módulo de 0 a 5° (figura 3). Toda la superficie se ancla a una cimentación perimetral a base de pilotes y se disponen zonas de abertura permitiendo que la retícula de módulos se acople al perfil cóncavo de la balsa en función del nivel de agua.

**Figura 3: Flotador unitario**



A diferencia de la versión anterior, este sistema no requiere de estructura metálica de soporte, amarres elásticos y anclajes metálicos articulados. A su vez la menor inclinación de los paneles FV (de 5 a 10° menos) disminuye las cargas de viento y por tanto las dimensiones y costes de la cimentación perimetral.

**Tabla 2: Características principales CFFV**

<b>Características Geométricas: Balsa “El Tolomo”</b>	
Profundidad útil	11 m
Superficie lámina de agua (11 m)	15,166.00 m <sup>2</sup>
<b>Características principales cubierta fotovoltaica (CFFV)</b>	
Dimensiones módulo flotante PEMD	1.85 x 1.20 m <sup>2</sup>
Nº de módulos flotantes	6,831.00 ud.
Nº de módulos flotantes en zona de pasillo	683 ud.
Nº de módulos flotantes útiles (Soporte panel PV)	6,148.00

### 3. Resultados

#### 3.1. Cálculo del consumo energético y costes en la situación actual

En la tabla 3 se determinan los costes energéticos del sistema de inyección directa en función de la actuación de una, dos o tres bombas, según la tarifa 3.1A (España, 2012). Para cada escenario de funcionamiento se calculan los costes del término de potencia y energía considerándose un reparto equitativo de las horas de funcionamiento en cada periodo.

Por su parte, la Tabla 4 resume las características hidráulicas del modelo de cálculo y costes de energía del sistema de inyección directa del Sector de riego “Tolomo Cota Alta” para las tres situaciones de funcionamiento según actuación de una, dos o tres electrobombas y presión máxima demandada.

**Tabla 3: Cálculo de costes energéticos**

Nº de bombas	3.00	2.00	1.00
Q total ( m3/s )	0.35	0.25	0.13
Volumen Anual ( m3 )	1,650,000.00	1,650,000.00	1,650,000.00
Tiempo de funcionamiento ( h/año )	1,328.50	1,833.33	3,666.67
Meses funcionamiento	8.00	8.00	8.00
Tiempo de funcionamiento ( h/día )	5.54	7.64	15.28
Potencia ( kW )	406.27	294.40	147.20
Consumo ( KWh/año )	539,733.33	539,733.33	539,733.33
Tensión de suministro ( kV )	20.00	20.00	20.00
Tarifa	3.1.A	3.1.A	3.1.A
<b>Término de potencia ( €/kW · año )</b>			
Período 1 - P1	25.59	25.59	25.59
Período 2 - P2	15.78	15.78	15.78
Período 3 - P3	3.62	3.62	3.62
<b>Término de energía ( €/kWh · año )</b>			
Período 1 - P1	0.13	0.13	0.13
Período 2 - P2	0.12	0.12	0.12
Período 3 - P3	0.08	0.08	0.08
<b>Tiempo de funcionamiento por períodos ( h/año )</b>			
Período 1 - P1	442.83	611.11	1,222.22
Período 2 - P2	442.83	611.11	1,222.22
Período 3 - P3	442.83	611.11	1,222.22
<b>Energía consumida ( kWh/año )</b>			
Período 1 - P1	179,911.11	179,911.11	179,911.11
Período 2 - P2	179,911.11	179,911.11	179,911.11
Período 3 - P3	179,911.11	179,911.11	179,911.11
<b>TOTAL ENERGÍA CONSUMIDA</b>	<b>539,733.33</b>	<b>539,733.33</b>	<b>539,733.33</b>
<b>Coste total Término Potencia ( €/Año )</b>			
Período 1 - P1	10,395.96	7,533.31	3,766.65
Período 2 - P2	6,410.91	4,645.59	2,322.79
Período 3 - P3	1,470.09	1,065.29	532.64
<b>TOTAL TÉRMINO POTENCIA</b>	<b>18,276.97</b>	<b>13,244.18</b>	<b>6,622.09</b>
<b>Coste total Término Energía ( €/Año )</b>			
Período 1 - P1	22,974.65	22,974.65	22,974.65
Período 2 - P2	21,049.60	21,049.60	21,049.60
Período 3 - P3	14,752.71	14,752.71	14,752.71
<b>TOTAL TÉRMINO ENERGÍA</b>	<b>58,776.96</b>	<b>58,776.96</b>	<b>58,776.96</b>
<b>Coste total Energía ( €/Año )</b>			
Coste total energía	77,053.93	72,021.14	65,399.05
Otros conceptos ( 3,262% )	2,513.50	2,349.33	2,133.32
Impuesto sobre la electricidad ( 4,864% )	3,870.16	3,617.38	3,284.77
Recargos reactiva y exceso de potencia	7,705.39	7,202.11	6,539.90
IVA ( 21,00% )	19,140.03	17,889.89	16,244.98
<b>TOTAL COSTE ENERGÉTICO ( €/año )</b>	<b>110,283.00</b>	<b>103,079.85</b>	<b>93,602.03</b>
<b>TOTAL COSTE ENERGÉTICO ( €/m3 )</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>
<b>Otros ratios</b>			
<b>COSTE ENERGÍA ( €/kWh )</b>	<b>0.20</b>	<b>0.19</b>	<b>0.17</b>
<b>GASTO ENERGÉTICO VOLUMÉTRICO ( kWh/m3 )</b>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>	<b>0.33</b>
<b>COSTE AGUA ( €/m3 )</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>
*Sin considerar pérdidas en líneas, centro de transformación, etc			

**Tabla 4: Resumen cálculo hidráulico y costes energéticos**

Sistema: Inyección directa	3 bombas	2 bombas	1 bomba
Superficie (ha)	330.00	330.00	330.00
Caudal (l/s)	345.00	250	125
Altura manométrica (m.c.a)	90.00	90.00	90.00
Potencia bombas (kW)	406.27	294.40	147.20
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	1,242.00	900.00	450.00
Volumen anual por ha (m <sup>3</sup> /ha · año)	5,000.00	5,000.00	5,000.00
Volumen total (m <sup>3</sup> /año)	1,650,000.00	1,650,000.00	1,650,000.00
Horas de funcionamiento anual (h/año)	1,328.50	1,833.33	3,666.67
Consumo anual (kWh/año)	539,733.33	539,733.33	539,733.33
Meses de consumo	8.00	8.00	8.00
Horas de funcionamiento mensual (h)	166.06	229.17	458.33
Horas de funcionamiento día (h)	5.54	7.64	15.28
<b>Coste anual (€)</b>	<b>110,283.00</b>	<b>103,079.85</b>	<b>93,602.03</b>
<b>Coste Energia (€/kWh)</b>	<b>0.20</b>	<b>0.19</b>	<b>0.17</b>
<b>Coste agua (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0.066</b>	<b>0.062</b>	<b>0.056</b>

### 3.2. Cálculo de la energía generada con la CFFV

La tabla 5 resume los cálculos fotovoltaicos realizados para la situación de cubrición completa de la lámina de agua con la CFFV. Se determina la potencia pico de la instalación fotovoltaica. Se obtienen los datos de radiación y producción anual para un sistema orientado al sur y con 5° de inclinación con un PR del 75% para el emplazamiento de la balsa (PVGIS, 2012). Igualmente se calcula la potencia nominal teórica para la situación de autoconsumo total observándose que la potencia resultante es muy inferior a la de la cubrición completa de la balsa.

**Tabla 5: Resumen cálculo de costes energéticos**

Nº de módulos FV (ud.)	6,148.00
Potencia unitaria panel FV (Wp)	235.00
Potencia pico total (kWp)	1,440.00
Producción anual: (kWh/año)	1,390.00
Potencia nominal sistema FV (1kWp)	
Potencia nominal: 100% demanda energética del grupo de inyección (Red de riego) (kWp)	388.30
Producción energía total anual CFFV (kWh/año)	2,007,160.00
Autoconsumo: Demanda energética del grupo de inyección (kWh/año)	539,733.33
Diferencia (kWh/año)	1,467,426.67

Así, en términos de energía, la Tabla 5 pone de manifiesto que el total de energía generada por la CFFV es del orden de 4 veces superior a la demanda energética necesaria por los grupos de inyección. De este modo, existe un excedente de producción ligeramente superior a 1467 MWh/año que permite pensar en vías de aprovechamiento como vertido a red o utilización para autoconsumo en otras instalaciones de la Comunidad de Regantes.

Finalmente, se procede a estimar la viabilidad económica de la cubrición considerándose un coste total de la CFFV de 1.55 €/Wp según se detalla en la tabla 6.

**Tabla 6: Estimación de la inversión de la CFFV**

Concepto	Importe (€/Wp)
Módulos fotovoltaicos	0.55
Inversor	0.18
Instalación CC/CA	0.06
Monitorización	0.01
Sistema flotante	0.50
Total	1.30
GG+BI (19%)	0.25
<b>TOTAL INVERSIÓN</b>	<b>1.55</b>

La tabla 7, resume el estudio económico realizado considerando dos situaciones de instalación de paneles FV sobre la superficie de la balsa:

- i) Cubrición completa con una potencia máxima instalada de 1,440.00 kWp. Una parte de la energía es utilizada para autoconsumo con un precio para la energía ahorrada de 0.19 €/kWh (Precio intermedio para los escenarios calculados en la tabla 3). El excedente de energía generada es vertida a la red general a un precio de 0.05 €/kWh.
- ii) Cubrición parcial de la balsa ajustándose a la potencia necesaria para la inyección directa de la red de riego. Se adopta una potencia real de cálculo de 1.25 veces la potencia nominal para considerar los efectos transitorios en situación de arranque. Los precios de la energía ahorrada y generada son iguales que en la situación anterior.

**Tabla 7: Estudio económico**

	Situación 1: P=1,440 kWp	Situación 2 P=507 kWp
Ahorros (€)	103,079.85	103,079.85
Ingresos (€)	73,371.33	8,249.83
<b>Total (€)</b>	<b>175,415.19</b>	<b>111,329.69</b>
Inversión (€)	<b>2,238,200.00</b>	<b>785,850.00</b>
Plazo amortización	12.68	7.06

La Tabla 7 obtiene el plazo de amortización de la inversión a precios constantes mostrando la mayor bondad de la situación 2. El mejor ajuste a la energía necesaria para autoconsumo (mayor ahorro en el precio de la energía) y la menor inversión inicial en la CFFV reduce el plazo de amortización sustancialmente.

Por su parte, en caso de actualización de precios de la energía, y considerándose una tasa de actualización constante del 5%, los plazos de amortización van equiparándose puesto que la situación 1 recupera la inversión a principios del año 11 y la situación 2 permanece igual que a precios constantes. Finalmente, se calcula la Tasa Interna de Rentabilidad de la

inversión obteniéndose un valor del 9% para la situación 1 y del 21% para la situación 2 para un horizonte de 25 años.

#### 4. Conclusiones

A partir de la situación real de partida del consumo de energía convencional de un grupo de bombeo de un sector de riego, "Tolomo Cota Alta" de la C.R. Virgen de las Nieves de Aspe, el presente artículo ha calculado los costes energéticos de tres escenarios hidráulicos según los periodos tarifarios vigentes.

A continuación, se ha analizado el potencial de generación de energía sostenible mediante el diseño de una CFFV instalada sobre la lámina de agua de la Balsa "El Tolomo", infraestructura de acumulación y regulación que alimenta la estación de inyección del sector de riego en estudio. El diseño FV de la CFFV pone de manifiesto que la cubrición completa de la lámina de agua genera un excedente de producción ligeramente superior a 1467 MWh/año, siendo la demanda energética de los grupos de bombeo solamente del orden del 25% del total generado. Así, al ahorro producido en la energía demanda por los grupos de bombeo, se suman los ingresos generados por el vertido a red. De este modo, se obtienen plazos de amortización estáticos de las inversiones muy atractivos, tanto para la situación de cubrición completa como para la cubrición parcial ajustándose a las necesidades exclusivas del riego. La viabilidad económica del planteamiento objeto de estudio mejora al introducir la actualización de precios de la energía con un TIR del 9% para la cubrición completa y del 21% para la cubrición parcial.

Por otra parte, y desde el punto de vista de la gestión hidráulica de la red de riego, cabe resaltar que los escenarios energéticos con producción exclusivamente FV exigirán la modificación de la planificación del riego para concentrarla a las horas diurnas. Así, futuros estudios abundaran sobre esta cuestión planteando su integración con otras energías renovables o utilizando una reserva de energía convencional para así poder ser utilizada en periodos de escasa o nula radiación solar.

Finalmente, los escenarios energéticos y económicos que la producción de energía en la CFFV ofrece se vislumbran muy prometedores puesto que la Comunidad de Regantes dispone de otras fuentes de consumo próximas que podrían utilizar los excedentes generados mejorando, sustancialmente, la factura eléctrica general de la propia Comunidad de Regantes.

#### 5. Referencias

- Bonnal, C. (1971) *Manual de riego colectivo por aspersión*. MOPU-OCDE, Madrid.
- Castro Gil M, Colmenar Santos A, Pérez García M, Perulero Castaño JM, Fiffe Verdecia, RP (2011). *Sistemas de bombeo eólicos y fotovoltaicos*. Sevilla: Progensa.
- European Comission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis> (16 Abril 2012).
- Ferrán Gozávez JJ, Ferrer Gisbert PS, Ferrer Gisbert CM, Redón Santafé M, Sánchez Romero FJ, Torregrosa Soler JB, Pons Puig E (2012). Cubrición de embalses mediante un sistema de cubierta flotante fotovoltaico: análisis técnico y económico. *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*. Valencia, AEIPRO.
- IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2012). *Referencias sobre autoconsumo de energía eléctrica en la normativa vigente*.

España. Orden IET/843/2012, de 25 de abril, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de abril de 2012 y determinadas tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de abril de 2012, núm. 100, pp. 32001-32018.