

## CUBRICIÓN DE EMBALSES MEDIANTE UN SISTEMA DE CUBIERTA FLOTANTE FOTOVOLTAICO: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO

José Javier Ferrán Gozávez  
Pablo S. Ferrer Gisbert<sup>1</sup>  
Carlos M. Ferrer Gisbert  
Miguel Redón Santafé  
Francisco Javier Sánchez Romero F  
Juan Bautista Torregrosa Soler  
Emili Pons Puig,<sup>2</sup>

Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria.  
Camino de Vera s/n 46022 VALENCIA. Tel 96 3877543. Fax 96 3877549

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Proyectos de Ingeniería. Camino de Vera s/n 46022 VALENCIA. Tel 96 3877007 ext 75681

<sup>2</sup> ISIGENERE, S.L.U. C/ Constitución, 19. 03460 Beneixama (Alicante)ponspuig@isigenerere.com

### Abstract

This paper presents the technic and economic analysis of a new photovoltaic floating cover system for reservoirs (CFFV). After the conceptual design phase, the technic and economic development of the system is carried out focusing on the key power and structural factors. Below, the technical development is complemented with the practical implementation of the solution in a full-scale installation locate in a reservoir in Agost (Alicante). The successful assessment of the pilot plant results then, in the full covering of the reservoir. A total number of 1.485 PV panels are set above 750 floating modules covering a surface area of 4.490 m<sup>2</sup>. The nominal power of the plant is 300 kWn, since its operation starting generates clean energy while enables reducing evaporation.

**Keywords:** *reservoirs, floating covers, hydric and power efficiency.*

### Resumen

Se realiza un análisis técnico y económico de un novedoso sistema de cubrición flotante fotovoltaica (CFFV) para embalses. Tras la fase de diseño conceptual, se realiza el desarrollo técnico y económico del sistema en función de las variables estructurales y eléctricas principales. A continuación, se procede a su implementación práctica mediante la ejecución de un prototipo de 20 kWn y 350 m<sup>2</sup> de superficie sobre una balsa en Agost (Alicante). La favorable evaluación del prototipo da lugar a la cubrición total que supone la instalación de 1.458 paneles PV sobre 750 elementos flotantes que cubren un área de 4.490 m<sup>2</sup>. La planta tiene una potencia nominal de 300 kWn, tras su puesta en funcionamiento y vertido a red, permite generar energía limpia y reducir la evaporación en la balsa.

**Palabras clave:** *embalses; cubiertas flotantes, eficiencia hídrica y energética.*

## 1. Introducción

La utilización de sistemas de cubrición en balsas de riego que minimizan las pérdidas por evaporación es una técnica aún poco extendida. Sin embargo, y siendo el agua un recurso cada vez más escaso, es esperable un interés creciente en los próximos años. En este sentido, las diferentes técnicas disponibles se resumen en: (i) métodos químicos, (ii) métodos físicos, (iii) métodos biológicos, (iii) métodos constructivos y de explotación y, (iv) métodos mecánicos (Craig et al., 2005)

De este modo, y entre los métodos anteriormente expuestos, cabe destacar los métodos mecánicos o estructurales que emplean estructuras fijas o flotantes. (Martinez Alvaret et al., 2009). Estas tecnologías consiguen reducciones de la evaporación de agua en las balsas en torno al 80%. Además, la interceptación de la radiación solar reduce la actividad fotosintética y el crecimiento de algas mejorando, por tanto, la calidad del agua. De este modo, y a partir de los numerosos estudios existentes, puede afirmarse que estos sistemas consiguen mejorar la eficiencia hídrica de los sistemas de riego (DNRM, 2003).

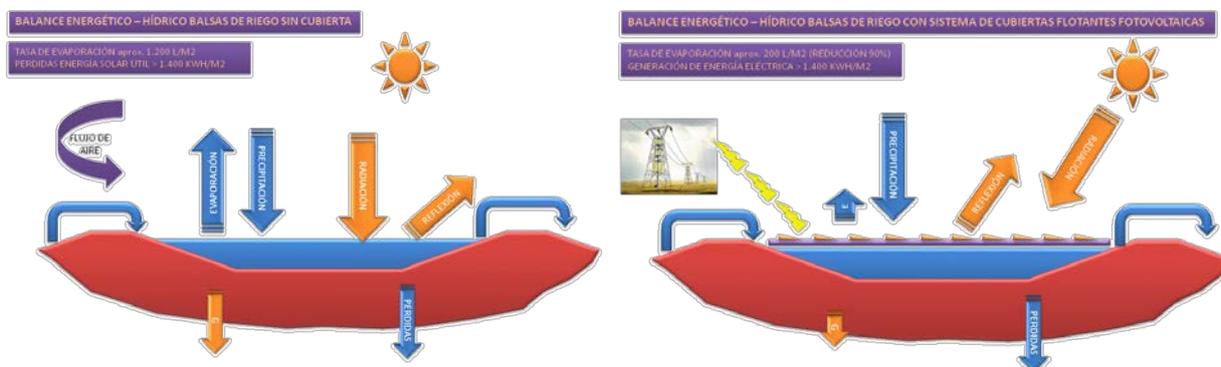
Al mismo tiempo, el consumo eléctrico asociado a muchas de estas infraestructuras de riego ha crecido de forma muy significativa en las últimas décadas debido a los planes de modernización de regadíos. De hecho, hoy en día la energía representa un importante porcentaje de los costes totales en la mayoría de comunidades de regantes. Así, y según apunta Corominas (2008), la transformación del riego tradicional a sistemas presurizados ha reducido desde 1950 los consumos de agua por hectárea en un 23% al tiempo que ha elevado la demanda energética en un 670%. Así, los planes de actuación en la agricultura de regadío han de dirigirse hacia la mejora de la eficiencia hídrica y energética.

En esta línea, este trabajo tiene como objetivo el desarrollo técnico y experimental de un sistema de cubrición modular flotante fotovoltaico para balsas de riego. Los beneficios y ventajas del sistema son múltiples, aumentan sinérgicamente y fomentan la sostenibilidad del sector agrícola.

## 2. Metodología: Diseño conceptual

El objetivo principal de la Cubierta Flotante Fotovoltaica (CFFV) es mejorar el balance hídrico-energético de las balsas de riego tal y como se observa en la Figura 1. La cubrición de la superficie de agua se materializa mediante la disposición de módulos flotantes que se unen entre sí mediante amarres articulados (Redón, 2011). Así, se intercepta la radiación solar incidente y se aprovecha para generar energía. Obsérvese como las necesidades básicas a cumplir por el sistema se fundamentan en asegurar la seguridad estructural del conjunto adaptándose en cada caso a las características propias de la balsa en estudio con el objetivo de maximizar la producción de energía eléctrica. A continuación, se analizan los factores básicos que delimitan la configuración geométrica y estructural de la cubierta fotovoltaica.

**Figura 1: Balance energético: a) Balsa sin cubierta b) Sistema de Cubrición Flotante Fotovoltaica**



## 2.1 Factores de diseño: Instalación fotovoltaica

Para satisfacer los requerimientos solares y energéticos propios de la central FV se han considerado los siguientes factores:

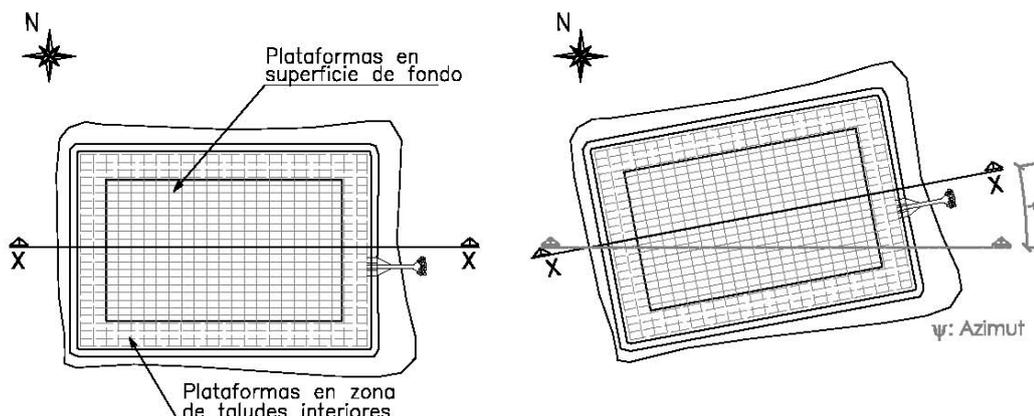
- Inclinación y orientación de los módulos para un mejor aprovechamiento de la radiación. Para el caso en estudio de instalación fija de los módulos FV sobre la cubierta flotante, tanto el ángulo de inclinación como la orientación respecto a la posición óptima Sur son variables a considerar para particularizarlas a cada situación específica.
- Dimensiones de los paneles solares: Se adopta una geometría base de 1,65 m de largo y 1,00 de ancho.
- Separación entre filas de panel solares para evitar efectos de sombreado: Función de la latitud del emplazamiento y asimismo, aumenta a medida que lo hace el ángulo de inclinación.
- Disposición de pasillos de servicio y mantenimiento para una correcta explotación de la instalación fotovoltaica.

## 2.2 Factores de diseño: Instalación sobre una balsa

La colocación en una balsa de una cubierta flotante que sea soporte de módulos fotovoltaicos, además de satisfacer los requerimientos eléctricos previos, ha de tener en cuenta las características funcionales y de diseño propias de la balsa como infraestructura de acumulación y regulación de agua. Así, las cuestiones analizadas son:

- Geometría y características de la balsa: La geometría en planta de las balsas es irregular buscando la máxima adaptación a la topografía de la zona. A su vez, las alineaciones principales de las balsas pueden ser o no las más idóneas para maximizar la producción de energía fotovoltaica en función de su grado de correspondencia con las direcciones cardinales (Figura 2).

**Figura 2: Orientación de los ejes principales de una balsa**



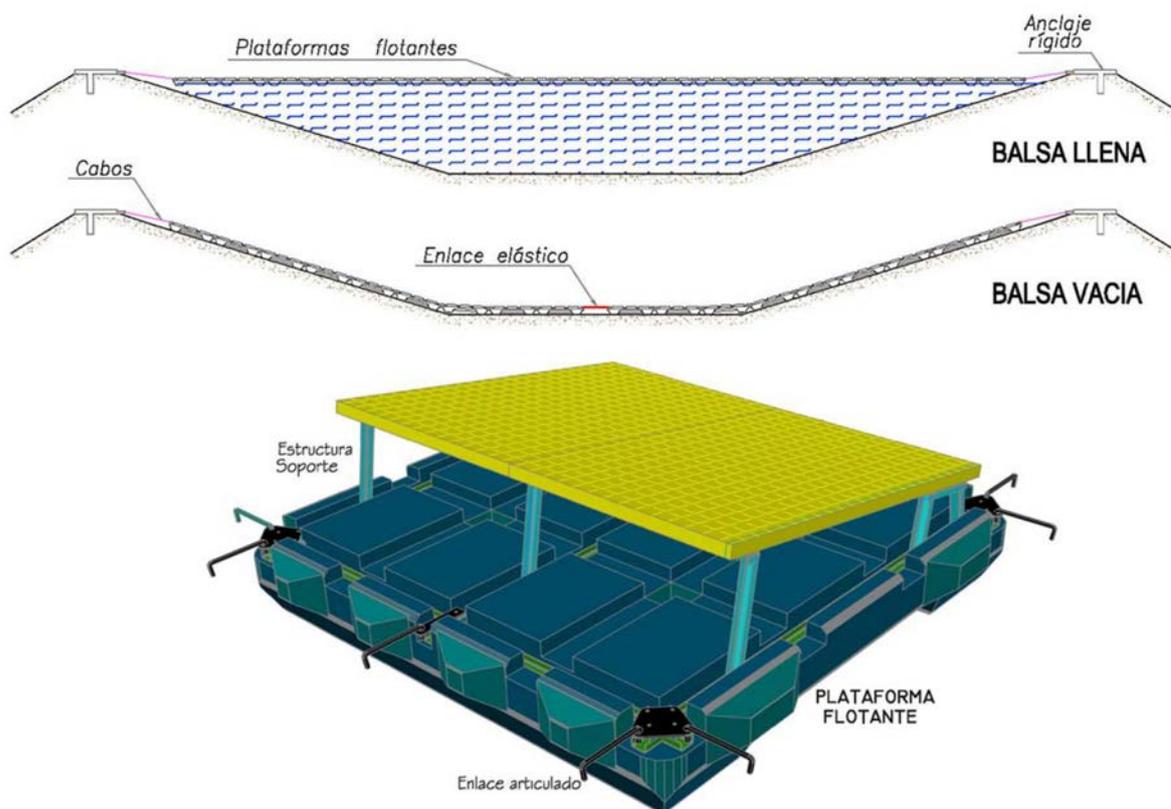
- Tipología y materiales de las plataformas flotantes: Los módulos de flotación deben ofrecer versatilidad dimensional y mecánica que permita el acople del sistema a las distintas situaciones que se pueden presentar en los taludes interiores de las balsas. Por ello, las unidades flotantes son simétricas de 2,35 x 2,35 metros.
- Inclinación de las placas fotovoltaicas ( $\alpha$ ): El ángulo de elevación de los módulos solares tiene gran influencia en las acciones de viento que solicitan a la cubierta.

### 2.3 Elementos que forman la CFFV

El sistema está constituido, desde el punto de vista estructural, por los siguientes elementos principales (Figura 3):

- Plataformas flotantes: Elemento responsable de garantizar la flotabilidad y estabilidad del conjunto del sistema y de la central de producción eléctrica. Se realizan en PEMD mediante la técnica de conformado de materiales plásticos del rotomoldeo, alberga dos paneles FV colocados sobre una estructura soporte.
- Estructura soporte de módulos FV: Pórtico metálico de perfiles conformados en frío UF y CF, responsable de soportar la acción de los módulos fotovoltaicos y transmitir las cargas de viento de unas plataformas a otras, hasta llegar a la cimentación perimetral.
- Enlaces metálicos articulados entre plataformas: Elemento responsable de unir entre sí las plataformas y transmitir las cargas horizontales, permite el giro de los módulos flotantes en el plano vertical para que la cubierta pueda acoplarse al perfil cóncavo de la balsa. Se materializa mediante un conector metálico (cadena, cable) que conecta los extremos respectivos del bastidor metálico de dos plataformas continuas.

**Figura 3: Elementos constituyentes de la CFFV**



- Enlaces elásticos: Elemento que posibilita la apertura de la cubierta y de este modo, el sistema se acopla a las distintas situaciones de nivel de agua en la balsa. Se materializa mediante un sistema mixto: gomas de caucho o EPDM que una vez alcanzado su máxima elongación no pueden deformarse más debido a un cabo rígido de poliéster o nailon que entra en tracción.
- Cabos: Elementos que amarran los módulos perimetrales de la cubierta flotante con el sistema de cimentación. Se materializan mediante cabos náuticos de poliéster y nailon.
- Anclaje rígido: Es el sistema de cimentación de la cubierta flotante, responsable de transmitir las solicitaciones horizontales de la CFFV al dique de la balsa. Se resuelve mediante el diseño de una serie de pilotes de hormigón armado que resisten la carga lateral movilizándose la presión pasiva del suelo circundante.

La unión de estos elementos entre sí conforma el conjunto de la CFFV.

### 3.- Resultados

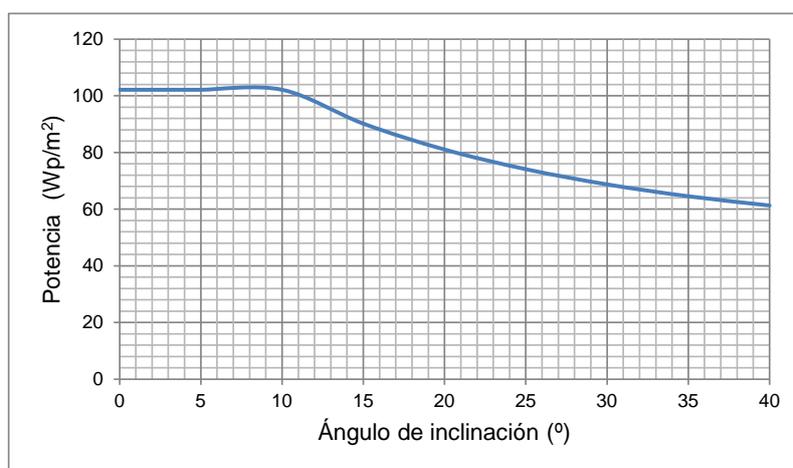
#### 3.1. Análisis conjunto de los factores de diseño

A partir de las dimensiones del módulo flotante se puede determinar el rendimiento eléctrico por unidad de superficie de cubierta en función de los factores eléctricos de diseño de una instalación fotovoltaica. De este modo, y en función del ángulo de inclinación, la cubierta flotante se caracteriza por:

- Para  $\alpha \leq 10^\circ$ : Retícula continua de unidades flotantes que cubren la totalidad de la superficie de la balsa.
- Para  $\alpha > 10^\circ$ : Retícula discontinua de unidades flotantes que no cubren toda la superficie de la balsa, existe una distancia libre entre alineaciones de filas de módulos que aumenta progresivamente según lo hace el ángulo de inclinación,

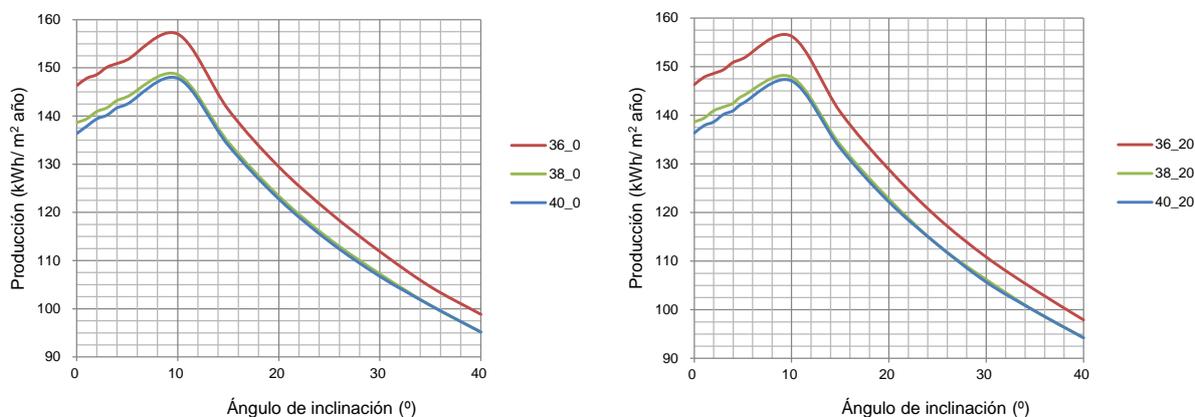
Si se adopta una potencia máxima estándar de los paneles FV de silicio monocristalino de 240 Wp, la Figura 4 muestra la evolución de la potencia instalada por unidad de superficie de cobertura en un CFFV. A medida que aumenta el área repercutada a cada módulo flotante (dimensiones de los paneles FV según la inclinación + distancia de sombreado + pasillo de servicio), la densidad de potencia de la central de producción disminuye desde los valores máximos que se producen entre 0 y 10°.

**Figura 4: Densidad de potencia en función del ángulo de inclinación**



Asimismo, se estima la producción de energía FV en diferentes latitudes de España (36°,38°,40°) para diferentes ángulos de inclinación y orientación a partir de los datos de radiación del Sistema Fotovoltaico de Información Geográfica de la Comisión Europea (GVSIG). Dada la potencia máxima del receptor solar (240Wp), los valores de producción FV se particularizan a dichas condiciones de instalación.

**Figura 5: Producción de energía en función del ángulo de inclinación en una CFFV**  
a) Latitud óptima Sur      b) Desviación 20°

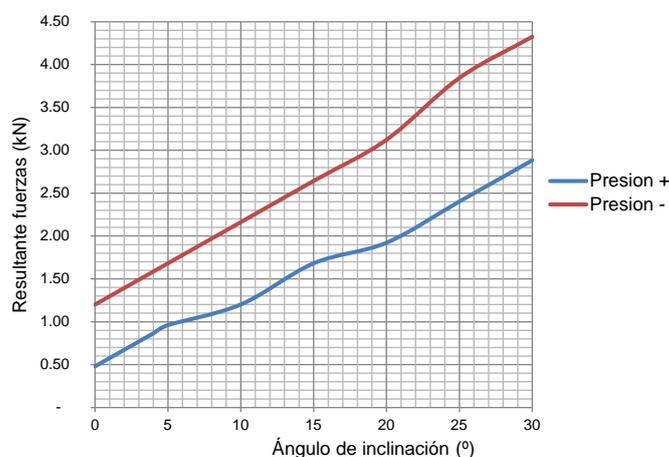


La Figura 5 muestra la energía eléctrica producida por unidad de superficie de cubierta en función del ángulo de inclinación para la orientación óptima Sur (Figura 5a) y para una

desviación en la orientación de 20° (Figura 5b). Se pone de manifiesto que aunque no se aprovecha al máximo la radiación solar de cada unidad individual, la mayor densificación conseguida con bajas inclinaciones de las placas ( $\leq 10^\circ$ ), independientemente de la orientación, permite aumentar la cantidad de energía generada por unidad de superficie a la vez que se consigue cubrir la totalidad de la superficie de la balsa. De la misma forma, la maximización de la superficie cubierta para ángulos inferiores o iguales a 10° logrará reducir al máximo la evaporación.

Asimismo, y desde el punto de vista estructural, el ángulo de elevación de los paneles solares tiene gran influencia en las acciones de viento que solicitan a la cubierta. A partir de la normativa europea de acción del viento (EN 1991-1-14), se determina el aumento de la resultante de las fuerzas de presión y succión para un módulo FV en función del ángulo de inclinación según recoge la Figura 6.

**Figura 6: Fuerzas de viento sobre un módulo FV según la inclinación**

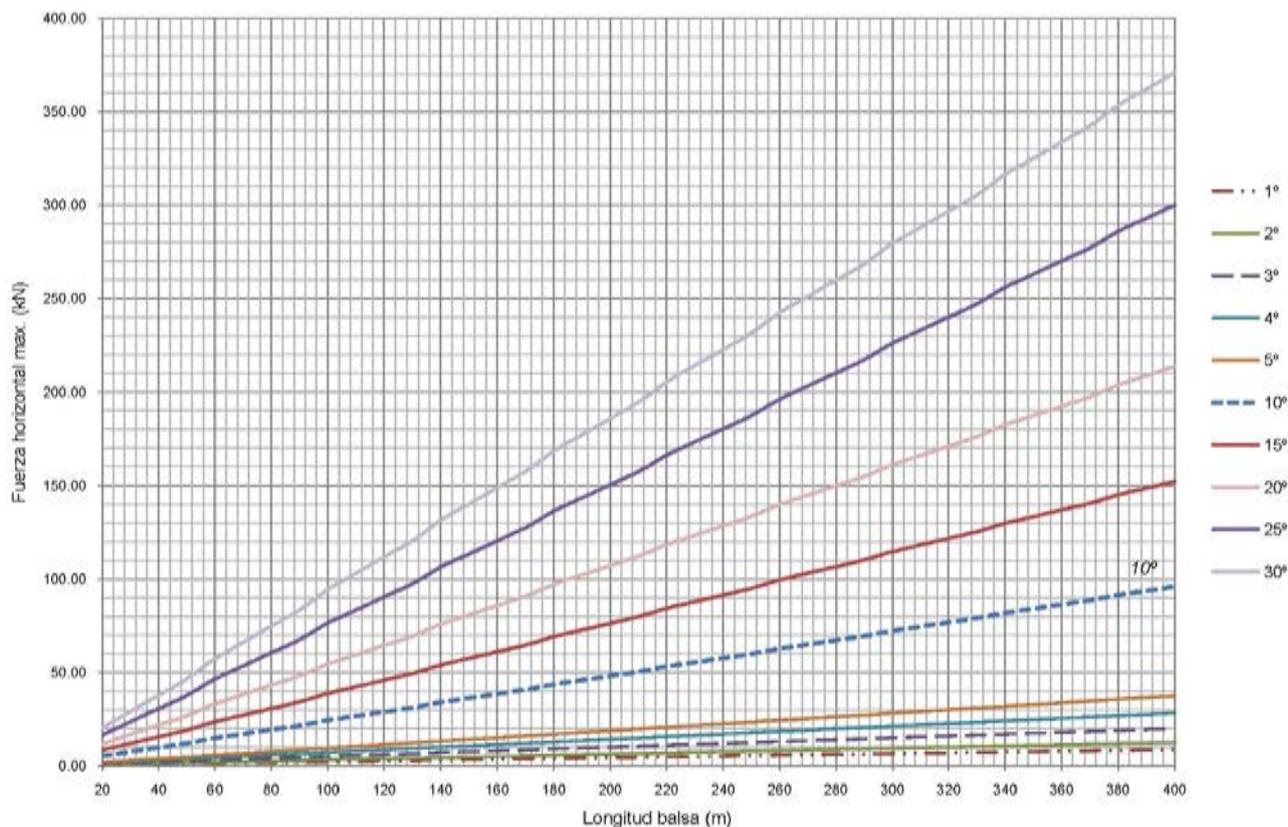


La componente del viento en el plano vertical es equilibrada mediante las fuerzas de sustentación, por su parte, la componente horizontal producirá una fuerza de arrastre en la cubierta que tiene que ser resistida por los sistemas de amarre y anclaje de la CFFV. Para un ámbito de estudio de balsas de riego de hasta 400 metros de longitud de fetch, y alturas de talud comprendidas entre 5 y 20 metros de altura, la Figura 7 muestra la caracterización de la fuerza horizontal que la acción de tiro produce en la CFFV.

La Figura 7 pone de manifiesto que las fuerzas horizontales a resistir por los amarres de la CFFV son muy variables en función de la elevación de los paneles FV. A partir de dicha carga lateral, se realiza el dimensionamiento mecánico y resistente de los elementos que constituyen la CFFV. Desde el punto de vista estructural, y principalmente por las limitaciones resistentes del sistema de cimentación, la sollicitación de 125 kN se considera el límite superior de carga a soportar por el sistema.

Así, y para unas características mecánicas estándar del cuerpo del talud donde se instalan los pilotes, las dimensiones obtenidas están comprendidas entre 1,50 y 4,00 metros de longitud y diámetros entre 0,25 y 0,55 metros. La geometría de la serie de pilotes guarda una proporción correcta respecto a las dimensiones de balsa a cubrir. Por lo general, la altura de los diques de las balsas aumenta a medida que crecen en tamaño, cuantitativamente significa pasar de alturas de talud de en torno a 5 m de altura para balsas pequeñas hasta 15-20 m para balsas grandes.

Figura 7: Fuerzas horizontales máximas en función del tamaño de la balsa



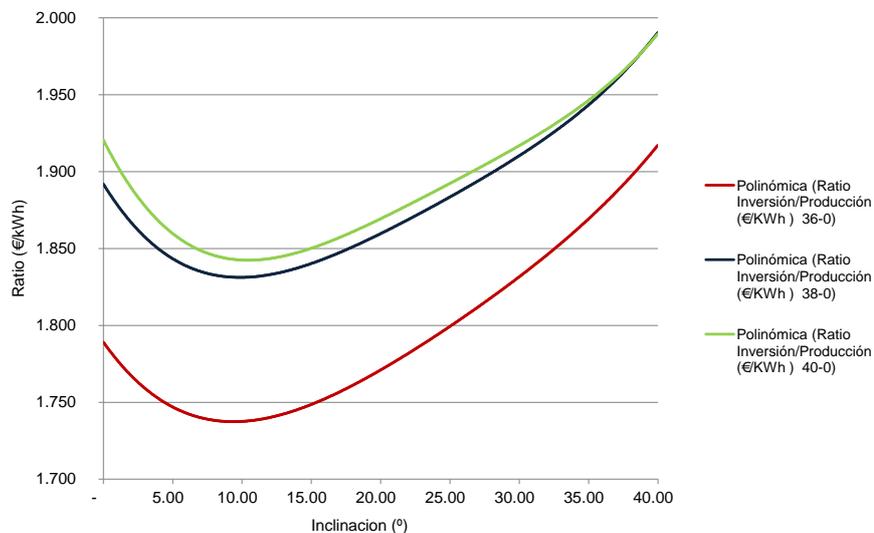
### 3.1. Análisis económico

Los factores de diseño con anterioridad expuestos, junto con el dimensionamiento estructural del sistema se utilizan para estimar los costes del sistema de cubierta en función del ángulo de inclinación según recoge la Tabla 1. Seguidamente, los valores de producción FV permiten obtener el ratio inversión/producción (€/kWh). Así, el ángulo de 10° es el que consigue un mejor ratio de inversión según ejemplifica la Figura 8 para las latitudes en estudio y orientación Sur. En situaciones de desviación del azimuth respecto a la posición óptima Sur, el ángulo de 10° también presenta el mejor ratio inversión/producción.

Tabla 1. Costes del sistema en función del ángulo de inclinación

INCLINACIÓN	-	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00
<b>ESTIMACION PRECIOS SISTEMA CUBIERTA</b>													
FLOTADORES	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00	195.00
ESTRUCTURA	55.00	60.00	65.00	65.00	70.00	70.00	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00
TRANSPORTE FLOTADORES	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
TENSORES	8.00	8.00	10.00	10.00	10.00	10.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
TORNILLOS Y REMACHES	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
MONTAJE	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
TOTAL PLATAFORMA	285.00	290.00	297.00	297.00	302.00	302.00	332.70	332.70	332.70	332.70	332.70	332.70	332.70
TOTAL PLATAFORMA €/m <sup>2</sup>	51.61	52.51	53.78	53.78	54.69	54.69	60.24	60.24	60.24	60.24	60.24	60.24	60.24
POTENCIA ( Wp/m <sup>2</sup> )	102.13	102.13	102.13	102.13	102.13	102.13	102.13	90.18	81.04	74.10	68.74	64.56	61.30
TOTAL €/Wp	0.51	0.51	0.53	0.53	0.54	0.54	0.59	0.67	0.74	0.81	0.88	0.93	0.98
<b>ESTIMACION PRECIOS SISTEMA CIMENTACIÓN Y GOMAS</b>													
AMARRES ELÁSTICOS, CABOS Y GRILLETES	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
CIMENTACIÓN PILOTADA	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
TOTAL CIMENTACIÓN Y GOMAS €/Wp	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.12	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15
TOTAL CUBIERTA €/Wp	0.61	0.61	0.63	0.63	0.64	0.64	0.71	0.79	0.88	0.95	1.02	1.08	1.13
SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE INVERSORES	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
SUMINISTRO Y CLASIFICACIÓN MÓDULOS	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
INSTALACIÓN C.C, C.A Y TT	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
MONITORIZACIÓN	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SISTEMA DE SEGURIDAD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
OBRA CIVIL ( movimiento de tierras, vallado )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INGENIERIA	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
SEGURIDAD SALUD/INSTALACIONES OBRA	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CONTROL CALIDAD	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MEDIA TENSIÓN													
Resto instalación	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
Total ( €/Wp )	2.56	2.57	2.58	2.58	2.59	2.59	2.67	2.74	2.84	2.91	2.97	3.04	3.09
Total ( €/m <sup>2</sup> )	261.55	262.45	263.72	263.72	264.63	264.63	272.23	247.42	230.08	215.54	204.30	196.18	189.31

Figura 8: Ratio inversión/Producción de la CFFV



### 3.2 Prototipo

La comprobación constructiva del desarrollo técnico de la CFFV se materializa en la realización de un prototipo a escala natural (1:1) en una balsa de riego situada en el término municipal de Agost (Alicante). La superficie inicial de cobertura FV son 350 m<sup>2</sup> que corresponde a una potencia máxima instalada de 20 kWn según muestra la Figura 9.

Desde su completa finalización en el primer trimestre de 2010, y hasta la fecha, el comportamiento estructural y funcional del prototipo completo ha sido completamente satisfactorio. A lo largo de este período, y para cada situación de llenado-vaciado de la balsa, la plataforma se ha acomodado adecuadamente a la superficie de apoyo pertinente

**Figura 9: Prototipo CFFV. a) Vista aérea b) Vista Frontal**



a)

b)

### 3.3 Cubrición balsa completa

La favorable evaluación del prototipo da lugar a la cubrición total del embalse, ello supone la instalación de 1.458 paneles FV sobre 750 elementos flotantes que cubren un área de 4.490 m<sup>2</sup>. La Figura 10 muestra el proceso gradual de montaje a partir de los módulos previamente instalados en el prototipo hasta su cubrición completa (Figura 11).

**Figura 10: Proceso de montaje**



**Figura 11: Cubrición completa**



La planta tiene una potencia nominal de 300 kWn que resulta en una producción anual de energía renovable de 475.000 kWh/año que se vierten directamente a la red. Asimismo, el ahorro de agua conseguido mediante la cobertura alcanza el valor de 5.000 m<sup>3</sup>, esta cifra supone un 25% de la capacidad de almacenamiento de la balsa.

#### 4. Conclusiones

El estudio combinado de los factores de diseño consustanciales de una central de energía fotovoltaica, junto con los propios y funcionales de su emplazamiento sobre una balsa de riego ha evidenciado que las unidades flotantes han de constituir un módulo base, simétrico, de dimensiones 2,35 x 2,35 m<sup>2</sup> que alojan, en la parte superior, dos paneles fotovoltaicos. El estudio técnico y económico de la inclinación de los paneles sobre la balsa ha concluido que la inclinación óptima es 10°.

Para el ámbito de estudio, embalses de hasta 400 metros de longitud y altura máxima de 20 metros de altura, se especifican las características de los elementos que mediante la unión sucesiva de las unidades flotantes consiguen formar una plataforma continua que ocupa la máxima superficie de la lámina de agua. Al mismo tiempo, se optimiza la producción de energía eléctrica dada una determinada superficie de balsa para las latitudes de la Península Ibérica. En definitiva, se consigue la máxima eficiencia hídrica y energética por unidad de superficie de balsa.

El desarrollo técnico se complementa con la favorable comprobación constructiva del prototipo en la Balsa "El Negret". Finalmente, y fruto de la confianza técnica generada, se procede a la cubrición completa de la balsa generando una producción anual de energía renovable de 475.000 kWh/año al tiempo que se consigue un ahorro de agua de 5.000 m<sup>3</sup>, valor equivalente al 25% del volumen de la balsa.

En conclusión, en zonas de clima árido y semiárido con recursos hídricos limitados, caso del levante español, el potencial de instalación de la técnica flotante fotovoltaica es manifiesto. De este modo, se podrá mejorar el balance hídrico y energético de las infraestructuras de acumulación de agua.

#### 5. Referencias

Asociación Española de Normalización y Certificación (2007). *Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de Viento*. UNE-EN 1991-1-4 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. AENOR, Madrid.

Corominas, J. (2009, Octubre) Agua y energía en el riego en la época de la sostenibilidad. In: *Jornadas de Ingeniería de Agua* (págs. 27-41), Madrid.

Craig I., Green, A., Scobie, M., Schmidt, E. (2005). *Controlling Evaporation Loss from Water Storages*. National Centre for Engineering in Agriculture, Publication 1000580/1, USQ, Toowoomba.

Department of Natural Resources and Mines (2003). *Methods for Reducing Evaporation from Storages used for Urban Water Supplies*. Final Report 41/122219/67346, Qld., Australia.

European comission. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (Obtenido 1 Abril 2012).

Martinez Alvarez, V., Baille, A. (2009). *Evaporación en masas de agua: Propuestas metodológicas y aplicaciones en la Cuenca del Segura*. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.

Redón Santafé, M. (2011). *Diseño de un Sistema de Cubierta Flotante Fotovoltaica para Balsas de Riego*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Miguel Redón Santafé  
Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria.  
Universidad Politécnica de Valencia  
46022 Camino de Vera s/n  
miresan@agf.upv.es  
34 963877007 ext 75431