

Cálculo de una instalación solar fotovoltaica autónoma

JOSÉ A. PIQUERAS

RESUMEN

En este artículo se expone un procedimiento válido y rápido para el cálculo de una pequeña instalación solar fotovoltaica autónoma para diferentes usos económicamente rentables, como el bombeo de aguas, la alimentación de equipos para la transmisión de señales de telecomunicación o la iluminación en granjas aisladas, entre otras posibles aplicaciones. El procedimiento expuesto pretende ser de utilidad para todos aquellos ingenieros y técnicos que necesitan determinar las necesidades de una instalación fotovoltaica autónoma, y se ilustra con un ejemplo en el que se calcula el número de módulos necesarios, se determina el regulador, las baterías y el ondulator o inversor necesarios, así como los costes de la instalación.

Introducción

¿Cuándo interesa montar una instalación fotovoltaica aislada? En primer lugar, debemos ser conscientes, a día de hoy, que una instalación fotovoltaica para cubrir las necesidades básicas de una vivienda, económicamente sólo es rentable en situaciones aisladas donde no llega la compañía eléctrica. Empíricamente podemos decir que a partir de 500 m o distancias superiores, donde los costes de conexión a la compañía son elevados.

El desarrollo de la energía fotovoltaica autónoma también tiene interés por criterios ecologistas o en un futuro a medio o largo plazo donde los materiales como los módulos fotovoltaicos aumenten sus prestaciones y disminuyan sus costes. En la actualidad, para una vivienda no aislada no tiene sentido montar una instalación fotovoltaica para autoconsumo propio, ni por su mantenimiento (baterías) ni económicamente, pues sus costes no se amortizan hasta 30 o 40 años, que es cuando hay que cambiar la instalación de nuevo; en consecuencia, económicamente interesa más pagar a la compañía eléctrica.

Aunque se utiliza principalmente en casas aisladas y hasta potencias del orden de los 3 kWp donde la compañía eléctrica no llega y los costes del punto de conexión son elevados, también podemos encontrar

pequeñas instalaciones fotovoltaicas autónomas para usos variados económicamente rentables, como el bombeo de aguas, alimentar equipos para transmisión de señales de telecomunicación, iluminaciones en granjas aisladas, etc.

Determinar las necesidades de la instalación fotovoltaica autónoma

En toda instalación fotovoltaica autónoma es muy conveniente, de partida, implicar al cliente en la elaboración inicial del cálculo del sistema aislado, por ejemplo, en la realización de algún documento como el de la hoja de la *figura 1*, donde se indiquen las características de la instalación y sobre todo los consumos previstos, pues por una parte es necesario para poder diseñar la instalación y, por otra, comprometerá el éxito a los datos facilitados por el cliente, para que luego no nos encontremos con que “donde dije digo, digo Diego”, pues en una instalación autónoma la adición de más campo fotovoltaico puede implicar modificar toda la instalación.

Elementos principales de una instalación fotovoltaica autónoma

En la *figura 2* podemos observar los componentes principales de una instalación fotovoltaica autónoma básica.



Módulos fotovoltaicos

Una célula fotovoltaica es un semiconductor con dos capas dopadas (tipo p y tipo n). Cuando la luz incide sobre la célula, se liberan electrones y da lugar a una corriente eléctrica continua.

De las obleas de silicio monocristalino obtenidas en el laboratorio, la parte de mayor rendimiento (el núcleo del material) del 25% al 30% se utiliza en aplicaciones de electrónica o en aplicaciones espaciales. El perímetro o entorno del núcleo, que tiene un rendimiento sobre el 15% - 18%, se utiliza para fabricar paneles fotovoltaicos monocristalinos.

El silicio policristalino está formado por la unión de múltiples cristales. La conducción de los electrones es algo más rápida en los monocristalinos que en los policristalinos, pues en éstos los electrones encuentran más dificultad en atravesar las barreras que suponen las uniones, lo que se nota más a temperaturas altas. Por tanto, la zona de captación de un módulo de igual potencia (Wp) es de dimensiones más reducidas si es de silicio monocristalino.

En instalaciones aisladas donde se intentan ajustar los costes y no hay problemas de espacio, pues son pequeñas, lo más habitual es montar paneles de silicio policristalino. De todas formas, tanto en

este tipo de instalaciones como en las conectadas a la red en general, se recomienda ver el rendimiento que da cada placa y sus características antes que fijarse en la tecnología constructiva.

El aumento de temperatura en las células supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto conjunto es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Una radiación de 1.000 W/m^2 es capaz de calentar un panel unos 30 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que generalmente reduce la tensión en torno a los 2 mV por cada célula y por cada grado que aumenta la temperatura; al disminuir el voltaje disminuye la potencia del módulo. Por ello los fabricantes de módulos indican un coeficiente de temperatura para el punto de máxima potencia PMPP (%/°C) que puede variar en función del fabricante entre valores del 0,3 al 0,49%/°C. Por ello, se estima una pérdida general entre el 3,5% y el 5% por cada 10 grados de aumento de la temperatura de trabajo de las cédulas STC 25 °C, por lo que es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien aireados.

En las instalaciones aisladas, como en la de nuestro cálculo, prácticamente no

influyen las pérdidas por temperatura, pues en verano tenemos más HSP (horas de sol pico) de las necesarias y en el invierno las temperaturas son bajas.

Hay que escoger cables que tengan una sección suficiente para que las caídas de tensión sean inferiores al 1,5%.

Regulador

Es el equipo al cual se conectan los módulos fotovoltaicos. El regulador controla la carga de las baterías, evitando descargas o sobrecargas excesivas y proporciona una tensión estable a su salida. Las intensidades máximas de entrada y salida del regulador a utilizar dependerán de la máxima que puedan producir los módulos fotovoltaicos.

Para elegir en un sistema aislado el regulador que le toca, se debe elegir uno que tenga capacidad para aumentar una corriente un 25% superior a la corriente de cortocircuito que le puede llegar de los módulos; por ejemplo, si son cinco módulos conectados en serie y cada módulo tiene una $I_{\text{nominal}} = 4,5 \text{ A}$; $I_{\text{cortocircuito}} = 4,75 \text{ A}$, se debe elegir un regulador de $5 \times 4,5 = 23,8$; $23,8 \times 1,25 \text{ A} = 29,75 \text{ A}$, en este caso elegiríamos un regulador de 30 A o superior.

En algunos casos es conveniente que el regulador incorpore protecciones,

Estudio Sistema Fotovoltaico Autónomo

Datos del cliente:

Nombre	José A.	NI			
Apellido	Piqueras Cano	Fecha	2008	Ciudad	Badalona
Dirección		Tel:		Provincia	Barcelona
Teléfono		Fax		e-mail:	piqueras@cebbat

Régimen de propiedad:
 Propiedad Alquiler Construido En construcción Proyecto Otras

Actividad:
 Libros: _____ Días ocupación semanal:

residencia habitual 2 residencias Sistema de bombeo Otras: _____
 embarcación

Consumo	Lista de aparatos	Potencia (w)	Horas funcionando	Total (Wh)	Tensión 230	Tensión 12V	Otros
5	Iluminación	15	5	375	X		
1	Lavadora	350	1,5	525	X		
1	Bomba de calefacción	110	10	1100	X		
TOTAL				2000	Total consum (Wh)da		

Características del lugar para el emplazamiento de los módulos fotovoltaicos:

Tipo de cubierta: Teja Plano (Etilóxido) Otra construcción Otra

Superficie disponible (largo x ancho): Otra construcción: _____

Inclinación aproximada de la superficie:
 0° 25° 45° 55° 90°

Orientación aproximada de la superficie:
 Oeste Norte Este

Viento predominante en la zona: leve moderado fuerte Muy fuerte

Sombras por obstáculos al sol: Edificio Árbol de hoja perenne Hoja caduca Definir

Notas: a) Si hay obstáculos se debe adjuntar un croquis, así como las horas en las que estos interrumpen al sol.

Autonomía completa en el mes de Diciembre: SI NO

Días de Autonomía deseada (días sin sol):

Lugar donde se instalará el equipo:

Visita realizada por: J.A. Piqueras

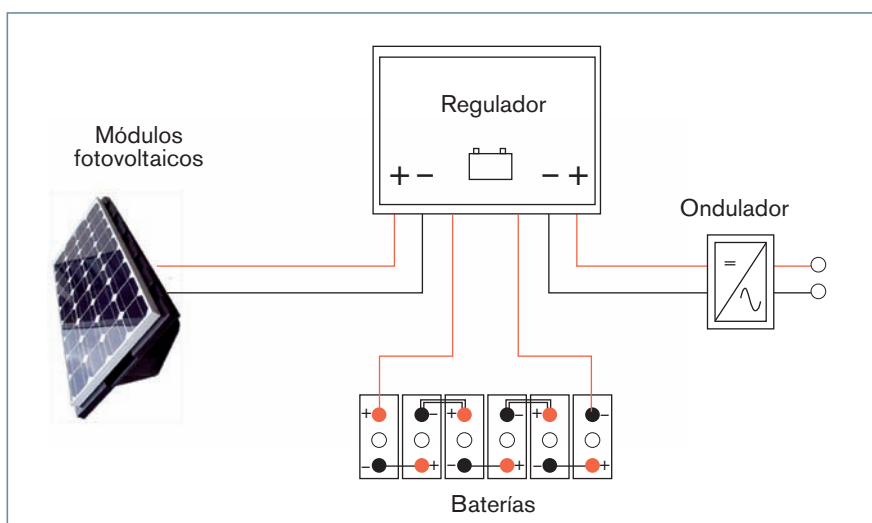
Figura 1. Datos de partida de la IFA.

como diodo de polarización, etc., sobre todo si el instalador es novel. Una marca reconocida como de calidad en el mercado sería Xantrex.

Baterías y tensión del sistema

Almacena la energía eléctrica producida por los módulos fotovoltaicos para poder ser utilizada en la instalación en horas sin

Figura 2. Componentes principales de una instalación fotovoltaica autónoma.



sol. Existen diversos tipos en función de los ciclos de carga/descarga que pueden realizar. Las más recomendadas son las de tipo GEL: son de 2.000 ciclos, consisten en módulos de 2 Vcc, los cuales se agrupan para formar sistemas de 12, 24 o 48 Vcc en consonancia con la tensión del sistema elegida y los módulos.

A la hora de hacer los cálculos, se consideran unas pérdidas generales del 10%, unas pérdidas en batería del 5% y una profundidad de descarga para no dañar las baterías del 75%. Se trata de un sobredimensionamiento de la batería, pues si se descargan mucho su vida útil disminuye. Por lo tanto, un método para conocer la capacidad de la batería en Ah necesarios se determinaría aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Capacidad batería} = \text{Ah}_{\text{necesarios}} \times \text{días} \times 1,1 / (0,95 \times 0,75) \quad [1]$$

Si las cargas conectadas no son de 12 Vcc es preferible elegir un sistema de 24 Vcc o 48 Vcc, pues de esta forma se reduce la intensidad del circuito de continua y por tanto las pérdidas. Por encima de instalaciones de 2.500 W se suele trabajar en sistemas de 48 Vcc.

Las baterías han de ser capaces de suministrar suficiente intensidad en las puntas de consumo solicitadas por el inversor. La capacidad de la batería debe ser como mínimo cinco veces mayor que el coeficiente de la potencia nominal del inversor en vatios / por la tensión nominal del sistema en voltios.

$$C_{\text{bat}} > 5 * P_{\text{nom}} / V_{\text{nom}} \quad [2]$$

Ondulador o inversor

Si los receptores o las cargas de la instalación están preparados para alimentarse a 230 Vac, nos hace falta un equipo para convertir una tensión continua en alterna, que es lo que realiza el equipo ondulator. Básicamente se puede decir que podemos encontrar onduladores con modulación por ancho de pulso de ondas cuadradas u ondulatorios senoidales (filtro a la salida) para cargas que requieren una señal de voltaje de alimentación más perfecta y que su potencia será superior a la suma de las potencias nominales de las cargas de la instalación que se puedan conectar simultáneamente y teniendo en cuenta los picos de arranque de las cargas como el que soporta el propio ondulator y su rendimiento.

Ejemplo de cálculo de una instalación fotovoltaica autónoma
 Supongamos que queremos calcular una instalación fotovoltaica autónoma (IFA),

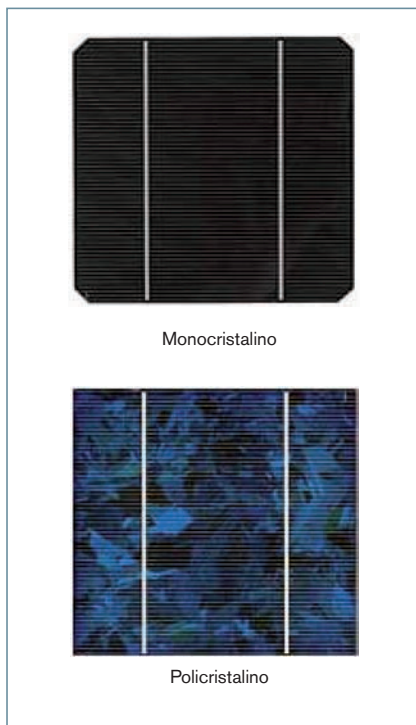


Figura 3. Diferenciación visual entre célula monocristalina y policristalina.

con las características indicadas en la figura 1. Se trata de dar suministro eléctrico a una casa aislada en los alrededores de la ciudad de Manresa. Los consumos previstos son cinco puntos de luz con lámparas de bajo consumo de 15 vatios, durante cinco horas al día, una lavadora de baja potencia que se utiliza una vez al día, la cual trabaja durante 1,5 h y que tiene un consumo medio de 350 W y, finalmente, una bomba de 110 W de una caldera de gasoil (centremos el tema en el cálculo y no en criterios ecológicos), que en invierno (incluido diciembre) trabaja unas 10 h al día. Todas las cargas o receptores son de 230 Vac, por lo que será necesario un ondulator. El sistema debe tener una autonomía de cuatro días sin sol y trabaja todos los días de la semana.

Determinación del número de módulos necesarios

En primer lugar, hemos de determinar el dato de las horas de sol pico (HSP), que burdamente podemos definir como la integración de toda la radiación que se produce en un día típico, equiparándola a un número determinado de horas en las cuales los módulos estarían produciendo a su potencia nominal. Técnicamente se define como las horas que resultan de dividir la energía incidente por unidad de superficie a lo largo de un día típico entre el valor de potencia estándar de 1.000 W/m^2 , que es el que utilizan los módulos para calibrar su potencia nominal.

Inclinació	Orientació: 0												
	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	DES	ANUAL
0°	6,34	9,35	13,78	18,64	22,48	24,29	23,56	20,44	15,86	11,02	7,22	5,50	14,90
5°	7,16	10,23	14,62	19,26	22,83	24,49	23,83	20,96	16,66	11,91	8,07	6,28	15,55
10°	7,95	11,06	15,36	19,79	23,05	24,53	23,95	21,36	17,35	12,73	8,99	7,02	16,11
15°	8,69	11,82	16,05	20,21	23,12	24,42	23,92	21,64	17,94	13,48	9,65	7,72	16,58
20°	9,37	12,50	16,62	20,50	23,05	24,17	23,75	21,82	18,43	14,15	10,35	8,38	16,94
25°	10,00	13,11	17,09	20,67	22,90	23,77	23,47	21,87	18,80	14,72	10,99	8,98	17,22
30°	10,57	13,64	17,46	20,71	22,62	23,32	23,09	21,79	19,05	15,21	11,56	9,53	17,40
35°	11,07	14,09	17,71	20,63	22,21	22,73	22,58	21,57	19,18	15,60	12,06	10,02	17,47
40°	11,50	14,44	17,86	20,42	21,66	22,00	21,93	21,22	19,20	15,89	12,48	10,44	17,43
45°	11,96	14,71	17,90	20,08	20,98	21,14	21,15	20,74	19,10	16,09	12,82	10,80	17,29
50°	12,13	14,88	17,82	19,62	20,18	20,15	20,24	20,13	18,88	16,18	13,08	11,08	17,04
55°	12,33	14,95	17,64	19,05	19,25	19,05	19,21	19,40	18,54	16,17	13,26	11,29	16,68
60°	12,45	14,93	17,34	18,36	18,21	17,83	18,07	18,56	18,09	18,06	13,34	11,43	16,23
65°	12,49	14,82	16,94	17,56	17,11	16,67	16,93	17,61	17,53	15,84	1,34	11,50	15,70
70°	12,45	14,61	16,43	16,66	15,98	15,38	15,70	16,55	16,87	15,53	13,26	11,49	15,07
75°	12,32	14,31	15,83	15,66	14,73	14,01	14,38	15,47	16,10	15,12	13,09	11,40	14,37
80°	12,12	13,92	15,136	14,59	13,42	12,57	12,99	14,30	15,24	14,61	12,83	11,24	13,57
85°	11,83	13,44	14,34	13,47	12,04	11,12	11,54	13,05	14,29	14,02	12,49	11,01	12,71
90°	11,47	12,87	13,46	12,58	10,61	9,74	10,15	11,74	13,25	13,34	12,07	10,71	11,80

Figura 4. Datos de la estación de Manresa, acimut 0°, Atlas Solar de Cataluña, edición año 2000.

Para determinar la energía incidente en la zona de la instalación en el mes de menor radiación solar, como la instalación trabaja todo el año, este mes será diciembre. Podemos ir al Atlas Solar de Cataluña y buscar en la estación de Manresa cuándo se produce la radiación máxima en el mes de diciembre. Para ello observamos en la figura 4 que la máxima radiación en diciembre se produce cuando las placas fotovoltaicas están inclinadas unos 65°. Habitualmente está más estandarizado coger 60° para no penalizar tanto el resto de meses. Además existen estructuras económicas de plástico (Console), figura 6, las

cuales se pueden montar a 30 o 60°. Por ello escogeremos una inclinación de 60°C, con la que se obtendrá una radiación diaria de $11,43 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$ que si lo pasamos a kWh ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ julios}$) tendremos $3,175 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ y que si lo dividimos por los 1.000 W/m^2 comentados tendremos $3,175 \text{ horas de sol pico}$.

Como la energía necesaria es de 2.000 Wh y la tensión del sistema (por lo explicado en el apartado de baterías) es de 24 Vcc , podemos determinar que los Ah del sistema serán $83,3 \text{ Ah}$ ($2.000/24$). Teniendo en cuenta que las pérdidas totales del sistema por toleran-

Figura 5. Ejemplo de datos de un módulo fotovoltaico de 160 Wp.

Características eléctricas	
Potencia (W en prueba -2%/+5%)	160 W
Número de células en serie	72
Corriente punto de máxima potencia (Imp)	4,55 A
Tensión punto de máxima potencia (Vmp)	35,30 V
Corriente en cortocircuito (Isc)	5,00 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	43,80 V
Coefficiente de temperatura de Isv (B)	1,68 mA/°C
Coefficiente de temperatura de Voc (B)	-172,9 mV/C
Características físicas	
Dimensiones (longitud x anchura x espesor)	1618 x 814 x 35 mm
Peso (aproximado)	14,8 kg
Especificaciones en condiciones de prueba estándar de: 1.000 W/m^2 , temperatura de la célula 25° y masa de aire de 1,5.	

cia módulos, rendimiento ondulador, caída de tensiones, polvo y suciedad se suelen contabilizar sobre el 15%, consideraremos que los Ah necesarios a producir por el sistema fotovoltaico que estamos calculando serán 95,83Ah.

Ahora vamos a buscar un módulo fotovoltaico. Supongamos que encontramos un módulo de 160 Wp que trabaje en sistemas de 24 Vcc, por ejemplo el de la firma Atersa, ref. A-160P, cuya intensidad nominal es de 4,55 A (-2+5%). Como ya tenemos los Ah (95,83Ah), las horas de sol pico (3,175 h) y conocemos los datos de la In del módulo (4,55A), ya podemos determinar el número de módulos que nos harán falta conectar en paralelo,

$$\text{Número módulos} = \frac{\text{Ah}_{\text{necesarios}}}{\text{HSP} \times \text{In}_{\text{módulo}}} \quad [3]$$

Aplicando [3] obtenemos:

$$\text{Número módulos} = \frac{95,83}{(3,175 \times 4,55)} = 6,63$$

El número de módulos necesarios sería de 6,63, por lo que elegiríamos 7 módulos de 160 Wp.

Determinación del regulador necesario

Según lo explicado en el apartado de regulador y teniendo en cuenta que la I_{SC} (intensidad de cortocircuito) del módulo es de 5A, como son siete módulos, la máxima intensidad de entrada prevista son 35A (5x7) y teniendo en cuenta el margen del 25%, elegiríamos un regulador de carga de más de 43,75A. En el mercado podemos encontrar reguladores de 45 y 50 A.

Determinación de las baterías necesarias

Teniendo en cuenta que los Ah necesarios que debe producir el sistema fotovoltaico son de unos 95,83Ah y que los días de autonomía deseados son cuatro, que se consideran unas pérdidas generales del 10%, unas pérdidas en batería del 5% y una profundidad de descarga para no dañar las baterías del 75%, tendremos, aplicando [1], que la capacidad de la batería necesaria sería de 591,79 Ah. En el mercado podemos encontrar baterías de 650 Ah como la Enersol T 650 (1.500 ciclos) o la de Gel OpzS Solar 660 (2.000 ciclos) de 2 V. En este caso serían 12 unidades.

Determinación del ondulador o inversor necesario

Para determinar la potencia del ondulador que pasará de 24 Vcc a 220 Vac, a

Tamaño instalación	100 Wp	1 kWp	3 kWp
Paneles	390 €	3.800 €	11.400 €
Estructura soporte y tornillería	60 €	450 €	1.050 €
Batería	270 €	2.050 €	5.100 €
Ondulador + Protecciones+ Monit.	190 €	1.350 €	3.000 €
Cableado y Varios	70 €	500 €	1.050 €
Montaje y puesta en marcha	185 €	1.100 €	2.400 €
Ingeniería, administración, Bº Industrial.	275 €	2.150 €	5.100 €
Total (€)	1.440 €	11.400 €	29.100 €

Tabla 1. Costes según la Asociación de la Industria Fotovoltaica, octubre 2006.

simple vista podríamos pensar que el consumo puntual simultáneo de la instalación parece que sea de unos 600 W, 75 W de bombillas, 110 W de la bomba y 350 W de la lavadora. Pero debemos tener en cuenta que la potencia nominal de la lavadora puede llegar puntualmente a 1.000 W según nos indica el fabricante, por lo que debemos elegir un ondulador por encima de los 1.200 W. Además, debemos tener en cuenta que tiene un rendimiento aproximado del 95%, y hay que prevenir la conexión puntual de otros receptores, por lo que elegiríamos un ondulador de 1.500 W, que también quedaría dentro de los márgenes para que las baterías cumplan la condición indicada en [2] $650 \text{ Ah} > 5 \times 1.500/24$.

Otras consideraciones a tener en cuenta en una IFA

En un sistema aislado lo primero a conectar al regulador son las baterías, después el campo fotovoltaico y por último la carga o receptores.

Si la IFA sólo se utiliza los fines de semana, el número de módulos necesarios se puede reducir notablemente, pues las baterías se pueden cargar en varios días.

En una IFA no se necesitan cargas de derivación, pues los módulos pueden quedar en circuito abierto sin sufrir daños. Pero puede interesar que los posibles excesos de energía controlados por el regulador sean utilizados para alimentar alguna carga de CC.

Si el sistema de bombeo de una IFA posee una bomba (ej. Shurflo) alimentada con un sistema aislado de 230 V su funcionamiento no depende de si al módulo le llega radiación solar o no, sino de la batería, ya que podremos hacerla funcionar cuando la necesitemos mediante una sonda, un temporizador, etc.

Si en un sistema de bombeo no hay baterías, sólo funcionará en horas de sol. Si la bomba es de 12 Vcc o 24 Vcc sólo funcionaría cuando haya luz y en función

de la radiación. Para que el caudal sea constante a la salida de la bomba, a ésta le debe llegar una tensión constante; por ello se coloca entre los módulos fotovoltaicos y la bomba una tarjeta electrónica de acoplamiento de cc/cc. Si la bomba, en lugar de un motor de corriente continua, tiene un motor asíncrono III de corriente alterna, los módulos se conectarían a la entrada del bus de continua de un convertidor de frecuencia, y el motor de la bomba a su salida.

Costes de una instalación fotovoltaica aislada

Si la IFA es fija y se ubica en un lugar de fácil acceso, podemos indicar grosso modo una serie de precios (sin IVA) orientativos del posible coste según lo indicado en el informe ASIF de octubre de 2006.

Por lo que estaríamos hablando de un coste de 11,4 €/Wp en instalaciones fotovoltaicas aisladas de 1 kWp y de 9,7 €/Wp en instalaciones de 3 kWp.

Bibliografía

Atlas de Radiació Solar a Catalunya, edición año 2000. Publicado por l'Institut Català d'Energia. Informe de la Asociación de la Industria Fotovoltaica, octubre 2006; www.asif.org

AUTOR

José A. Piqueras
jpiqueras@cetib.cat

Ingeniero técnico eléctrico (Electrónica Industrial) por la EUETI de Barcelona. Sus áreas de trabajo son las instalaciones solares fotovoltaicas tanto de conexión a red como aisladas, así como el diseño de armarios eléctricos de control de maquinaria, automatización mediante PLC, pantallas táctiles, comunicaciones entre equipos, aplicaciones con todo tipo de variadores de velocidad de motores, conmutaciones de líneas y consultas sobre el REBT.