

# Criterios para la correcta elaboración del diseño de una instalación fotovoltaica

<b>Apellidos, nombre</b>	Elisa Peñalvo <sup>1</sup> (elpealpe@upvnet.upv.es) Javier Cárcel <sup>2</sup> (fracarc1@csa.upv.es) Clara Andrada <sup>1</sup> (claanmon@upv.es)
<b>Departamento</b>	<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería Energética <sup>2</sup> Instituto de Tecnología de Materiales
<b>Centro</b>	Universitat Politècnica de València

## 1 Introducción

En la actualidad, las energías renovables están siendo objeto de estudio debido al incremento de coste de los combustibles fósiles, su escasez y los problemas medioambientales derivados.

Las energías renovables se caracterizan por ser limpias, inagotables y además pueden complementarse para abastecer una zona de forma auto-gestionada. De esta forma, la integración de estas energías y nuevas formas de generación de energía en nuestra sociedad está evolucionando cada vez más rápido. La mayor parte de energías tienen su origen en el sol, y entre ellas se puede destacar la solar fotovoltaica.

El diseño de una instalación fotovoltaica es un procedimiento complejo, que consiste en la integración de diferentes componentes que deben estudiarse y dimensionarse correctamente.

## 2 Objetivos

- Concienciarse en el uso de energías renovables.
- Identificar los componentes necesarios para una instalación fotovoltaica.
- Conocer cómo se realiza el diseño de una instalación y su dimensionamiento.
- Saber cuáles son los puntos críticos del dimensionamiento y cómo tratarlos.

## 3 Desarrollo

A continuación, se presenta cómo realizar el diseño de una instalación fotovoltaica para abastecer las necesidades eléctricas de una instalación situada en Ávila, España.

### 3.1 Estimación de la demanda

Para saber cuál es la demanda que queremos abastecer, se realiza una estimación. Deberán tenerse en cuenta cada uno de los equipos domésticos que consumen electricidad y cuántas horas están en funcionamiento al día. Por un lado, deberán identificarse aquellos equipos que consumen en continua (DC) y qué tensión e intensidad son necesarias para su funcionamiento. Por otro lado, se identificarán aquellos equipos que funcionan en alterna (AC), tensión e intensidad de operación. Se deberá establecer un rendimiento de conversión de electricidad alterna a continua, siendo en este caso 0.9 para los equipos que funcionan en AC y 1 para los que ya están funcionando en DC.

Con todos estos datos, se puede elaborar una hoja de cálculo que sintetice toda la información y que muestre la potencia (W) y el consumo total diario de energía (Ah/día). En la figura 1 se muestra un ejemplo:



Se asumirá una potencia instalada de 3kW y se calculará la inclinación que deberán tener los paneles solares para optimizar la captación solar en el emplazamiento, mediante la fórmula:

$$\beta = |F| + 10^\circ = 40 + 10 = 50^\circ$$

Donde F es la latitud del emplazamiento dada por el PVGIS.

Ambos datos se introducen en el programa (encuadrados en verde en la figura 2).

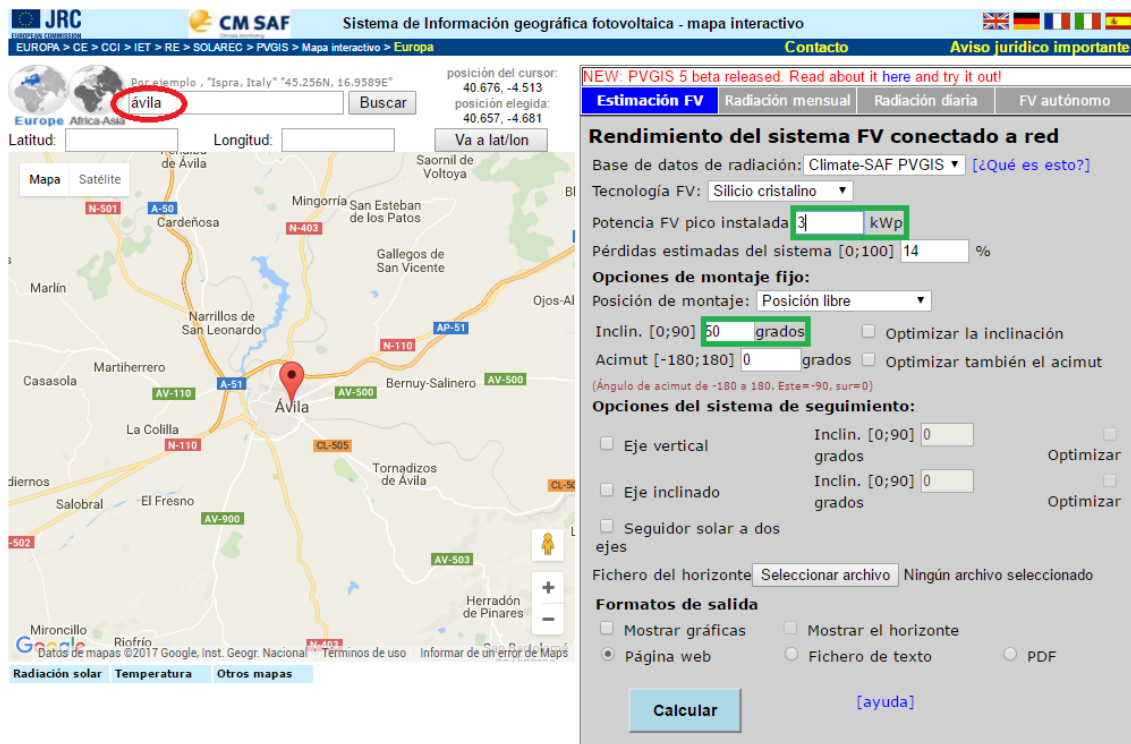


Figura 2: Programa PVGIS para el cálculo de instalaciones fotovoltaicas

Una vez introducidos todos los datos en el programa se realiza el cálculo, aportando los siguientes datos de radiación y generación eléctrica:

- **E<sub>d</sub>**: producción de electricidad media diaria por el sistema dado (kWh).
- **E<sub>m</sub>**: producción de electricidad media mensual por el sistema dado (kWh).
- **H<sub>d</sub>**: media diaria de la irradiación global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema dado (kWh/m<sup>2</sup>).
- **H<sub>m</sub>**: suma media de la irradiación global por metro cuadrado recibida por los módulos del sistema dado (kWh/m<sup>2</sup>).

Utilizando el criterio del peor mes, los datos de interés son los que están encuadrados en rojo en la figura 3.

Sistema fijo: inclinación=50°, orientación=0°				
Mes	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Ene	7.84	243	3.21	99.6
Feb	9.94	278	4.10	115
Mar	11.80	365	5.03	156
Abr	11.40	342	4.96	149
Mayo	11.60	360	5.15	160
Jun	12.80	383	5.76	173
Jul	13.70	426	6.32	196
Ago	13.90	431	6.37	197
Sep	13.20	395	5.89	177
Oct	11.30	350	4.88	151
Nov	8.23	247	3.42	103
Dic	7.89	245	3.24	100
<b>Media anual</b>	<b>11.1</b>	<b>339</b>	<b>4.87</b>	<b>148</b>
<b>Total para el año</b>		<b>4060</b>		<b>1780</b>

Figura 3: Programa PVGIS para el cálculo de instalaciones fotovoltaicas para una instalación en Ávila

Según estos datos, el peor mes será enero. En este mes se producirán 7,84 kWh al día y se consumirán 2.4672 kWh. La potencia consumida se calcula como el producto del consumo total 205.6 (Ah/día) por la tensión en continua, que son 12V.

Debido a que se ha sobredimensionado, lo cual también es beneficioso para posibles alteraciones en la instalación, se obtiene una autonomía de:

$$\text{Sobredimensionamiento} = \frac{\text{Generación}}{\text{Consumo}} = \frac{7840 \text{ (Wh)}}{2467.2 \text{ (Wh)}} = 3.2 \text{ días}$$

### 3.3 Elección de los módulos fotovoltaicos

En la elección de los módulos fotovoltaicos debe tenerse en cuenta las especificaciones de diseño de éstos que proporciona el fabricante. Es importante saber que estos están definidos por unas curvas características de tensión-intensidad. Estas curvas no son únicas, sino que varían con la temperatura y con la radiación incidente sobre la célula fotovoltaica.

El cálculo de la potencia es igual al producto entre la tensión y la intensidad. De esta forma se define la potencia máxima como el producto entre la máxima intensidad  $I_{MPP}$  y la máxima tensión  $V_{MPP}$  que aparecen en la figura que se presenta a continuación:

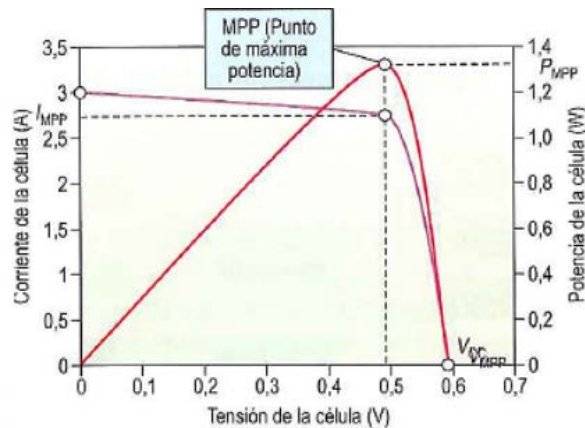


Figura 4: Curva característica I-V de un módulo fotovoltaico

Definidos estos aspectos, se busca en las fichas técnicas de los paneles y se selecciona el panel en función de sus características. En base a las demanda a cubrir y las características de la instalación, se han seleccionado los siguientes paneles de acuerdo a la eficiencia:

Empresa	Paneles solares	Vppm	Ippm (A)	Pot (W)	Precio IVA inc	€/kW
1	Green Power 170 w monocristalino	35,6	4,77	169,8	194 €	1,14
	Atersa A-75 P	17,83	4,21	75,1	157 €	2,09
	Atersa A-200 M	37,18	5,38	200,0	277 €	1,39
	Atersa A-240 P	29,21	8,21	239,8	218 €	0,91
	A- 250 P GSE	31,26	8,02	250,7	231 €	0,92
	Atersa A-240 P	29,21	8,21	239,8	218 €	0,91
	A- 310 P GSE	36,53	8,57	313,1	261 €	0,83
2	185W monocristalino PLUTO185/Ade - SUNTECH	35,6	4,77	169,8	147,7 €	0,87
	250W monocris - STP250S-20/Wd (T) - SUNTECH	31,26	8,02	250,7	217,8 €	0,87
	320W policristalino - KD320GH-4YB - KYOCERA	36,53	8,57	313,1	393,3 €	1,26
	RED270-60M-270W (Efi=19,40%)	31,48	8,58	270,1	222,8 €	0,83
	RED260-60M-260W (Efi=18,68%)	31,26	8,317	260,0	210,5 €	0,81
	JinKo JKM200M-72 (EU) 200W	36,9	5,42	200,0	152,8 €	0,76
3	AMERISOLAR AS-5M 210 W (Efi=16,45%)	37,3	5,64	210,4	186,3 €	0,89
	MÓDULO FV LUXOR LX200M DE 200 Wp	37,39	5,39	201,5	182 €	0,90
	MÓDULO FV AXITEC AC250P DE 250 Wp	30,7	8,18	251,1	198 €	0,79
4	MÓDULO FV AXITEC AC300P DE 300 Wp	36,73	8,18	300,5	242 €	0,81
	LUXOR Ecoline 72/200 Wp	37,39	5,39	201,5	203 €	1,01
	LUXOR Ecoline 60/250 Wp	30,83	8,16	251,6	223 €	0,89
	Axiworld power AC-300P/156-72s(MIA)	36,73	8,18	300,5	270 €	0,90

Figura 5: Paneles solares a seleccionar

En la figura 6 aparecen las especificaciones técnicas de los paneles que se han seleccionado.

Especificaciones		
Modelo	RED270-60M	RED260-60M
Potencia máxima (Pmax)	270W	260W
Tensión de potencia máx. (Vmp)	31,48V	31,26V
Tensión de corriente máx. (Imp)	8,58A	8,317A
Tensión de circuito abierto (Voc)	38,56V	38,32V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9,27A	8,9A
Eficiencia de célula (%)	19,40%	18,68%
Máxima tensión del sistema (V)	1000VDC	1000VDC
Coef. de temp Isc (%)/°C	0,037%/°C	0,037%/°C
Coef. de temp Voc (%)/°C	-0,34%/°C	-0,34%/°C
Coef. de temp Pmax (%)/°C	-0,48%/°C	-0,48%/°C
Temperatura nominal de funcionamiento de célula	45±2°C	45±2°C
Tolerancia	±3%	±3%
Tipo de célula (mm)	Mono 156x156	Mono 156x156
Nº de células	60 células	60 células
Tipo de conectores	MC4	MC4
Peso (kg)	18	18
Dimensiones (mm)	1640x992x40	1640x992x40

Figura 6: Especificaciones de los paneles solares

Puesto que ambos paneles serían aptos para la instalación, se calcula según la potencia que produce cada, uno el número de paneles que serían necesarios y con ello el precio de la inversión.

- **Panel de 260W**

$$\text{Número de paneles} = \frac{P_{\text{instalada}}}{P_{\text{panel}}} = \frac{3000W}{260W} = 11,5 \text{ paneles}$$

Aproximadamente 12 paneles de 260W. Siendo el precio 210.5€ por panel, el precio a pagar sería:

$$\text{Coste} = 12 \text{ paneles} * 210,5€ = 2526€$$

- **Panel de 270W**

$$\text{Número de paneles} = \frac{P_{\text{instalada}}}{P_{\text{panel}}} = \frac{3000W}{270} = 11,1 \text{ paneles}$$

En este caso 11 paneles de 270W. Siendo el precio 222.8€ el coste sería:

$$\text{Coste} = 11 \text{ paneles} * 222,8€ = 2450,8€$$

Esta segunda opción sería la más económica y la que menos espacio ocuparía ya que habría menos paneles.

### 3.4 Elección de los acumuladores

Puesto que la producción de energía solar y su consumo no coinciden en el tiempo, es necesaria alguna forma de almacenamiento.

Los tipos de baterías más comunes son las de plomo y ácido, ya que son relativamente baratas y capaces de cargarse con corrientes eléctricas de muy diversa intensidad. Sus capacidades varían mucho, son capaces de almacenar desde 0.1 a 100 kWh.

Uno de los conceptos que cabe destacar es la profundidad de descarga. La capacidad de la batería se reduce ligeramente debido a los ciclos de carga y descarga. Conforme más profunda es la descarga de la batería, mayor capacidad pierde.

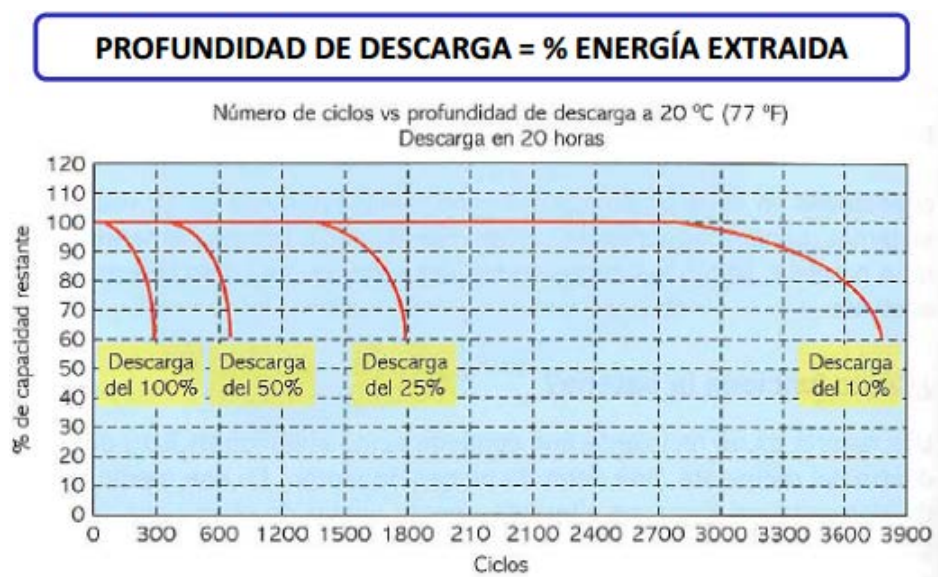


Figura 7: Pérdida de capacidad de una batería en función de la profundidad de descarga

Para el cálculo de la capacidad necesaria para la instalación, se definen primeramente algunos conceptos previos:

- Consumo medio diario,  $L_D$
- Autonomía necesaria,  $F_{SB}$
- Profundidad máxima de descarga,  $PD_{max}$

Suponiendo que en el caso de la instalación que estamos dimensionando se abastece una demanda de 2467,2 Wh y se requiere de una autonomía de 4 días. Sabiendo que la profundidad de descarga recomendada por el fabricante del 60%, la capacidad de batería necesaria se calcularía en base a la siguiente expresión.

$$C_B = \frac{L_D * F_{SB}}{PD_{max}} = \frac{2467.2Wh * 4días}{0.6} = 16448Wh$$



De la misma forma que con los paneles fotovoltaicos, se selecciona del catálogo una batería, que en este caso es la que está encuadrada en rojo:

Empr.	Baterías	V	I (A)	Pot (W)	Precio IVA	€/Wp
1	Monoblock Enersol 250 Ah – 12v	12	250	3 000	375 €	0,13 €
2	Monoblock Saclima 220A (C20) - 250A (C100)	12	250	3 000	199,7 €	0,07 €
	Monoblock 6FM230-X 230A (C100)	12	230	2 760	323,8 €	0,12 €
3	Monoblock Enersol 250 Ah – 12v	12	250	3 000	235 €	0,08 €
4	Monoblock Enersol 250 Ah – 12v	12	250	3 000	350 €	0,12 €

Figura 8: Catálogo de baterías

Sabiendo que funciona en corriente continua, para una tensión de 12V se hace la conversión de la capacidad a amperios-hora.

$$C_B = \frac{16448Wh}{12V} = 1371 Ah$$

Seguidamente, habría que determinar el número de baterías que hacen falta para cubrir las necesidades energéticas. Se calcula el número de bancos de baterías según la capacidad necesaria en la instalación y la capacidad de una batería. La capacidad de la batería se encuentra en la ficha de especificaciones técnicas, como la que se presenta en la figura 9:

INFORMACIÓN DE LA BATERÍA	
Marca	HBL
Modelo	2 TGI 850
Tipo	Tubular Gel Valve Regulated Lead Acid
Tensión Nominal (V)	2
Tensión de flotación 25° C (V)	2,25
Tensión de Ecuilibración 25° C (V)	2,35
C100 (Ah)	1190,00

Figura 9: Especificaciones técnicas de las baterías

El número de baterías se calcularía como:

$$\text{Número de baterías} = \frac{\text{Capacidad instalación}}{\text{Capacidad batería}} = \frac{1371 Ah}{1190 Ah} = 1.15$$

Aproximadamente 2 baterías.

El número de bancos depende de la tensión que se necesite alcanzar. Puesto que se trabaja en continua serán 12V. Como una batería consume 2V:

$$\text{Bancos de baterías} = \frac{\text{Tensión línea}}{\text{Tensión batería}} = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 6$$

Siendo necesario en total 6 bancos de 2 baterías en paralelo para abastecer la instalación.

Tensión nominal del sistema (V)	Tensión nominal de la batería (V)	Baterías en serie	Baterías en paralelo	Nº total de baterías
12	2	6	2	12

Figura 10: Resumen de baterías necesarias en la instalación

### 3.5 Elección del regulador

El regulador de carga es un dispositivo electrónico esencial para una instalación fotovoltaica, ya que se encarga de diversas funciones. Por un lado, protege la batería, interrumpiendo la conexión con los paneles fotovoltaicos cuando la batería está completamente cargada, mientras que, cuando está por debajo cierto umbral, corta la conexión con la red de consumo para que no sobrepase la profundidad de descarga y dañe el acumulador. Asimismo, el regulador también protege la entrada de la batería de sobretensiones de forma que podrían dañarla. Por otro lado, se encarga de que el panel fotovoltaico funcione siempre en el punto de máxima potencia fijando la corriente.

Para su correcta elección, se escoge un regulador con seguimiento del punto de potencia. Se comprueban los valores de tensión e intensidad máximos admisibles por el regulador y una vez escogido el regulador adecuado se consulta nuevamente la ficha de especificaciones técnicas en buscar de valores similares, tal y como están indicados en la figura 11.

Especificaciones eléctricas	
Tensión nominal de la batería	12, 24, 36, 48 o 60 V CC
Tensión máxima del campo FV en funcionamiento) 140 V CC	140 V CC
Tensión máxima de circuito abierto del campo FV	150 V CC
Intensidad de cortocircuito del campo	Máximo 60 A CC
Tamaño mínimo máximo de los cables de los conductos	Entre 2,5 y 10 mm
Consumo total durante el funcionamiento	2,5 W (tara)
Método de regulación del cargador:	Tres etapas (en bruto (bulk), absorción, flotación) Dos etapas (en bruto (bulk), absorción)

Figura 11: Ficha de especificaciones técnicas de un regulador de carga

Una vez obtenidos, hay que asegurarse de que los valores que presentan los paneles de tensión de circuitos abierto y corriente de cortocircuito, no sobrepasen estos valores.

Teniendo como datos los valores de los **paneles** que se presentan a continuación:

- Corriente de cortocircuito del panel  $I_{sc}=9.27A$
- Tensión de circuito abierto  $V_{oc}=38.56V$

Mientras que los datos proporcionados por el **regulador** de carga en la figura 11 son:

- Corriente máxima del regulador  $I_{MAX}=60A$
- Tensión de circuito abierto máxima  $V_{oc}=150V$

Puesto que los valores de los paneles no sobrepasan los del regulador, es aceptable el regulador. A continuación, se calculará cuantos paneles se pueden poner en función de las características dadas anteriormente:

$$I_{sc} = 9.27 * 4 = 37.08A < 60A$$

$$V_{oc} = 38.56 * 3 = 116V < 150V$$

La conclusión es que se podrán poner 4 strings de 3 paneles cada uno. En total, 12 paneles.

### 3.6 Elección del inversor

El inversor es uno de los componentes más importantes de la instalación que también es utilizado en microrredes eléctricas. Su principal función es la de transformar la corriente continua en corriente alterna.

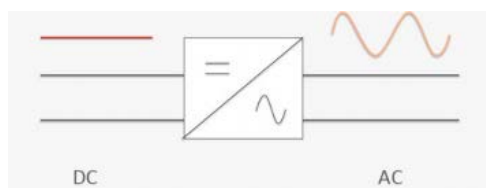


Figura 12: Esquema de un inversor

El inversor de una instalación actúa como una fuente de corriente, impone a la célula del panel fotovoltaico la intensidad que debe proporcionar para que trabaje en el punto de máxima potencia.

Para la elección del inversor, en primer lugar, debe estimarse la potencia que se necesitará en la red alterna. En este caso se ha estimado una potencia de 445kW, aproximadamente.

Además, el modelo del inversor tiene que tener una tensión de entrada de 12V.

Con estas características se puede seleccionar un inversor según su ficha de especificaciones técnicas como se presenta a continuación:

Modelo	XPC 1400-12	XPC 2200-24	XPC 2200-48	C 1000-12	C 2000-24	C 4000-48	HPC 2800-12	HPC 4400-24	HPC 6000-48	HPC 8000-48
<b>Inversor</b>										
Tensión nominal de batería	12 V	24 V	48 V	12 V	24 V	48 V	12 V	24 V	48 V	
Campo de tensión de entrada	9,5-16 V	19-30 V	38-64 V	9,5-16 V	19-32 V	38-64 V	9,5-17 V	19-34 V	38-68 V	
Potencia continua @ 25 °C	1.100 VA	1.600 VA	1.600 VA	1.300 VA	2.300 VA	3.500 VA	2.500 VA	4.000 VA	5.000 VA	7.000 VA
Potencia 30 min. @ 25 °C	1.400 VA	1.400 VA	2.200 VA	2.200 VA	1.600 VA	2.600 VA	4.000 VA	2.800 VA	6.000 VA	8.000 VA
Potencia 5 sec. @ 25 °C	3 x Pnom									
Potencia máxima	Hasta cortocircuito									
Carga asimétrica máxima	Hasta Pcont									
Ajuste de stand-by	1 a 25 W									
Cos φ	0,1-1									
Rendimiento máx.	94 %	95 %	94 %	95 %	93 %	94 %	93 %	94 %	96 %	
Consumo OFF/Stand-by/ON	0,5/0,6/4 W	0,8/0,9/7 W	1,2/1,3/7 W	0,5/0,6/6 W	0,8/0,9/9 W	1,2/1,4/12 W	1,4/1,8/10 W	1,7/2/16 W	2/2,5/18 W	2/3/30 W
Tensión de salida	Onda Sinusoidal 230 Vac (+0/-10%) (XPC están disponibles también en versión 120 Vac.)									
Frecuencia de salida	50 Hz +/- 0,05% (controlado por cuarzo)									
Distorsión armónica total	< 4%									
Comportamiento dinámico	0,5 ms (salto de carga de 0 a 100%)									
Protección de sobrecarga y cortocircuito	Desconexión automática con tres intentos de reinicio									
Protección de sobre temperatura	Alarma acústica antes de corte y reinicio automático									

Figura 13: Ficha de especificaciones técnicas del inversor

## 4 Cierre

Conocer como dimensionar de manera muy básica una instalación fotovoltaica aislada. Identificar los elementos más importantes de su diseño así como sus funciones más importantes.

## 5 Bibliografía<sup>1</sup>

### 5.1 Libros:

A. Pérez-Navarro, D. Alfonso, E. Peñalvo-López, A. Escrivá: "Estudio de Prospectiva sobre Energía Nuclear y su Papel para la Consecución de un Escenario Energético Sostenible en la Comunidad Valenciana", Agencia Valenciana de Prospectiva (AVAP), 2010.

### 5.2 Comunicaciones presentadas en conferencias (sin publicar):

E. Peñalvo-López, F.J. Cárcel-Carrasco, C. Devece, I. Morcillo: "Methodology for analysing sustainability in Energy scenarios". 2nd International Conference on Business Management. Valencia, España, Julio 2017.

### 5.3 Referencias de fuentes electrónicas:

D. Connolly; et al. (2010). "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems". Applied Energy, Vol. 88, pp. 1059-1082.

<sup>1</sup> Se recomienda consultar el siguiente documento: Cómo citar la bibliografía en los trabajos académicos. Disponible en : <http://riunet.upv.es/handle/10251/31590>

E. Loken E. (2007). "Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1584–1595.

Grubb, et al. (1993). "The cost of limiting fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions: a survey and analysis". *Ann Rev Energy Environ, Ann Rev, California*, Vol. 18, pp 397-478.

International Energy Agency (IEA) (2010). "World energy outlook 2010". International Energy Agency. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf>

International Energy Agency (IEA) (2011). "Energy for all: financing access for the poor". International Energy Agency, Paris. [http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energydevelopment/weo2011\\_energy\\_for\\_all.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energydevelopment/weo2011_energy_for_all.pdf)

International Energy Agency, IEA (2016). "Country Statistics". <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CONGOREP&product=balances&year=2014> [Accessed: 11/12/2016].

United Nations Development Programme (UNDP) (2003). "Sharing innovative experience: examples of successful uses of renewable energy sources in the South". Vol. 8. Ed. by United Nations Development Programme (UNDP), New York.

United Nations (2000). "Commercialization of renewable energy technologies for sustainable development." ISBN-13: 978-9211199666. United Nations, New York.

World Bank (2001). "The World Bank's energy program: poverty reduction, sustainability, and selectivity". World Bank, Washington, D.C. <http://siteresources.worldbank.org/INTENERGY/Publications/20269216/energybrochure.pdf>