

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA



“Alumbra el día de mañana con el de hoy”

Barret Browning

Diego Oñate Arresti

www.diegoonate.es

Junio 2006

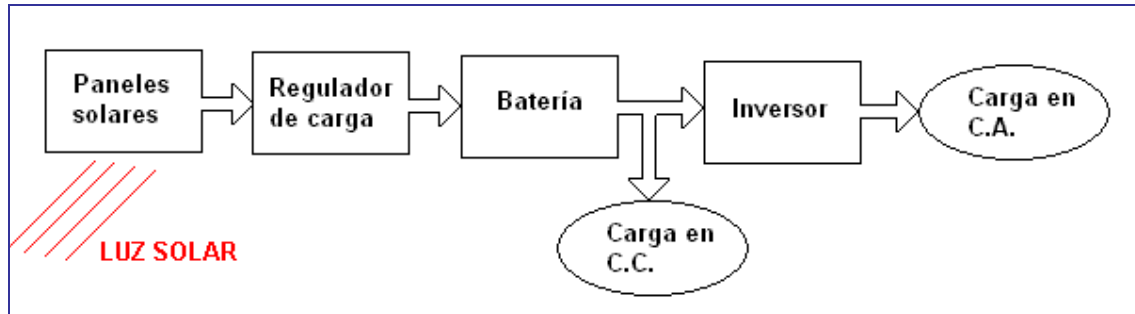
ÍNDICE

1. Fundamentos de los sistemas fotovoltaicos.....	3
2. Descripción del proyecto	4
3. Dimensionado de la instalación fotovoltaica.....	5
4. Evaluación económica de la instalación fotovoltaica.....	11

1. FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

El esquema de proceso de un sistema fotovoltaico es el siguiente:

Figura 1.1 - Diagrama del proceso fotovoltaico



En primer lugar la luz solar incide en los paneles ó módulos fotovoltaicos formados por un material semiconductor de silicio cristalino que posee efecto fotoeléctrico, es decir, transforma (con un rendimiento aproximado del 18 %), la luz solar en energía eléctrica continua de 12 V.

Posteriormente esa electricidad debe acumularse en una batería para disponer de energía durante periodos nocturnos ó de poca irradiación solar (días nublados, o con niebla).

Entre los paneles solares y la batería es necesario incluir un regulador de carga de modo que cuando la batería esté cargada (por medida de su tensión) el regulador cierre el aporte de energía desde los paneles solares a la batería, para impedir la sobrecarga de ésta y por consiguiente el acortamiento de su vida útil.

Finalmente, la energía acumulada por la batería (en forma de corriente continua) puede emplearse como tal en luminarias y otros equipos, si bien lo más habitual es transformar, por medio de un inversor, la corriente continua en alterna a 230 V y 50 Hz en forma de onda senoidal pura que es el estándar eléctrico en España, pudiendo entonces alimentar equipos como televisiones, lavadoras, frigoríficos, que trabajan con corriente alterna, y que son habituales e imprescindibles para la vida diaria.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto trata sobre el abastecimiento eléctrico de una vivienda rural, por medio de una instalación solar fotovoltaica aislada.

Está situada en la aldea de Uyarra, en las estribaciones de la Sierra de la Demanda, en las cercanías de Ezcaray (La Rioja). Su altitud topográfica es de 870 m. sobre el nivel del mar y presenta una buena insolación solar, sin sombras de importancia, y con frecuentes días soleados continuos en periodo estival.

La casa se utiliza exclusivamente en fines de semana y en periodos vacacionales entre los meses de mayo y septiembre. Dadas las rigurosas condiciones invernales de la zona y la falta de un sistema de calefacción integral en la casa (dispone sólo de una chimenea en el salón-comedor, con exhaustación del calor de los gases de combustión al piso superior) no se ocupa entre los meses de octubre y abril. Durante este periodo sólo se realizan visitas ocasionales y de un día de duración.

Dispone de dos plantas y una buhardilla. En la inferior se encuentra el salón-comedor y la cocina; en la superior las tres habitaciones y el baño; y por último la buhardilla, que cumple funciones de ático. La superficie total, es de 150 m².

El aporte de agua se realiza desde un depósito de abastecimiento de agua para usos ganaderos, situado 20 metros por encima del nivel de la casa, por lo que no es necesario efectuar bombeo (la presión es suficiente para hacer funcionar el calentador de agua de gas butano). La evacuación de agua se realiza por gravedad, a través de dos depósitos de depuración en serie, donde el agua residual es tratada química y biológicamente para posteriormente ser evacuada al río que cursa 20 metros por debajo del nivel de la casa.

No dispone de suministro eléctrico ni telefónico de línea fija.

3. DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

En primer lugar estimaremos los consumos eléctricos diarios de los equipos eléctricos que vayan a operar de continuo en la instalación:

Tabla 3.1 – Consumo energético estimado

Elemento	Unidades	Potencia (W)	Horas (h)	Energía (W·h)
Luz cuarto estar (<i>Philips Ecotone</i>)	4	11	6	264
Luz dormitorios (<i>Philips Ecotone</i>)	3	11	2	66
Luz cocina (<i>Philips fluorescente</i>)	2	18	3	108
Frigorífico (<i>Lynx</i>)	1	-	24	300 *
Lavadora (<i>Lynx</i>)	1	350	1	350
Televisión (<i>Samsung</i>)	1	85	3	255
Consumo energético teórico: E_T (W·h)				1.343

* Consumo medio proporcionado por el fabricante (temperatura exterior 20 C - interior 5 C).

A partir del consumo energético teórico E_T (W·h), deberemos calcular el consumo energético real E (W·h), necesario para hacer frente a los múltiples factores de pérdidas que van a existir en la instalación fotovoltaica, del siguiente modo:

$$E = \frac{E_T}{R} \quad (3.1)$$

Donde R es el parámetro de rendimiento global de la instalación fotovoltaica, definido como:

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) \cdot \left(1 - \frac{k_a \cdot N}{p_d} \right) \quad (3.2)$$

Los factores de la ecuación 3.2 son los siguientes:

- k_b : *Coefficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador:*
0,05 en sistemas que no demanden descargas intensas.
0,1 en sistemas con descargas profundas.
- k_c : *Coefficiente de pérdidas en el convertidor:*
0,05 para convertidores senoidales puros, trabajando en régimen óptimo.
0,1 en otras condiciones de trabajo, lejos del óptimo.
- k_v : *Coefficiente de pérdidas varias:*

Agrupar otras pérdidas como (rendimiento de red, efecto Joule, etc.).
0,05 – 0,15 como valores de referencia.

- k_a : *Coefficiente de autodescarga diario*:
0,002 para baterías de baja autodescarga Ni-Cd.
0,005 para baterías estacionarias de Pb-ácido (las más habituales).
0,012 para baterías de alta autodescarga (arranque de automóviles).
- N : *Número de días de autonomía de la instalación*:
Serán los días que la instalación deba operar bajo una irradiación mínima (días nublados continuos), en los cuales se va a consumir más energía de la que el sistema fotovoltaico va a ser capaz de generar.
4 - 10 días como valores de referencia.
- p_d : *Profundidad de descarga diaria de la batería*:
Esta profundidad de descarga no excederá el 80 % (referida a la capacidad nominal del acumulador), ya que la eficiencia de este decrece en gran medida con ciclos de carga - descarga muy profundos.

En la realización de este proyecto se han considerado los siguientes valores de los coeficientes de pérdidas:

$$k_b = 0,1 / k_c = 0,05 / k_v = 0,1 / k_a = 0,005 / N = 4 / p_d = 0,7$$

Según la ecuación 3.2, el rendimiento de la instalación fotovoltaica R , es el siguiente:

$$R = (1 - 0,1 - 0,05 - 0,1) \cdot \left(1 - \frac{0,005 \cdot 4}{0,7} \right) = 0,728 \quad (3.3)$$

Y a partir de la ecuación 3.1, el consumo energético real E (W·h) es:

$$E = \frac{1.343}{0,728} = 1.845 \text{ W·h} \quad (3.4)$$

Una vez definida la utilidad energética real E (W·h), se puede obtener fácilmente la capacidad del banco de baterías C (A·h) necesario, del siguiente modo:

$$C = \frac{E \cdot N}{V \cdot p_d} = \frac{1.845 \cdot 4}{12 \cdot 0,7} = 879 \text{ A·h} \quad (3.5)$$

Donde V (V) es la tensión nominal del acumulador, 12 V.

A partir de la capacidad calculada, seleccionaremos el equipo comercial más próximo en prestaciones, dentro de la categoría de baterías plomo-ácido. En nuestro caso el banco de baterías seleccionado será el **Isofotón 2.AT.900** (900 A·h - C100, 1,85 V / 12 V). *Catálogo:* <http://www.isofoton.es/html/zip/at.zip>.

Una vez definida la batería vamos a pasar a calcular los paneles solares necesarios para la instalación. Para ello deberemos conocer, a partir de valores estadísticos históricos de la zona, el valor de irradiación solar diaria media en superficie inclinada H (kWh/m²-día) del lugar. Para ello se hará uso de base de datos de irradiación solar mundial online: <http://sunbird.jrc.it/pvgis/solradframe.php> y de las coordenadas geográficas del lugar (latitud N = 42° 21' 10" / longitud W = 2° 58' 5").

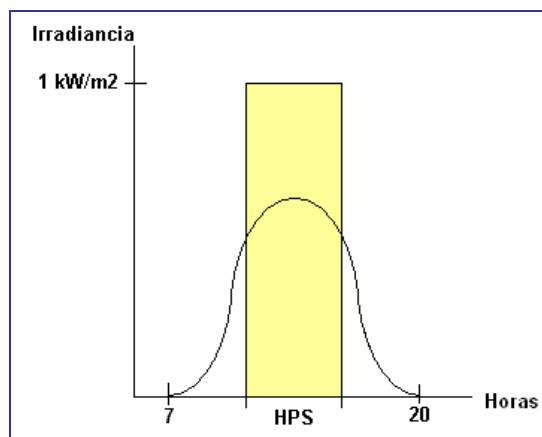
Los resultados mensuales medios se recogen en la siguiente tabla, donde se ha considerado que los paneles se disponen en orientación Sur con una inclinación de 40° (una de las vertientes del tejado cumple con esas especificaciones). Se ha considerado unas pequeñas pérdidas por sombreado al atardecer (0,2 % anual), debido a una pequeña colina situada en las proximidades.

Tabla 3.1 – Irradiación solar diaria media, H (kWh/m²-día)

MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
H	2,741	3,572	4,997	5,026	5,532	5,903	6,124	5,961	5,560	4,322	2,982	2,257	4,587

Ahora es necesario introducir un concepto muy importante, las horas de pico solar **HPS** (h), definido como las horas de luz solar por día equivalentes, pero definidas en base a una irradiancia I (kW/m²) constante de 1 kW/m², a la cual está siempre medida la potencia de los paneles solares. Es un modo de estandarizar la curva diaria de irradiancia solar:

Figura 3.1 – Definición de las horas de pico solar



Como puede verse en la figura 3.1, el área definida por el rectángulo (irradiación en base a las horas de pico solar) es igual al área definida por la curva horaria de irradiancia real.

La irradiación **H** (kWh/m²) es igual al producto de la irradiancia de referencia **I** (1 kW/m²) por las horas de pico solar **HPS** (h). Luego entonces los valores numéricos de la irradiación y horas de pico solar son iguales.

$$H (\text{kWh/m}^2) = I (1 \text{ kW/m}^2) \cdot \text{HPS} (\text{h}) \quad (3.6)$$

Entonces, según la ecuación 3.6, los valores numéricos de la tabla 3.1 son igualmente válidos para las horas de pico solar.

Tabla 3.2 – Horas de pico solar, HPS (h)

MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
HPS	2,741	3,572	4,997	5,026	5,532	5,903	6,124	5,961	5,560	4,322	2,982	2,257	4,587

Los paneles solares producen una energía eléctrica durante todo el día equivalente a sólo las horas de pico solar operando a su máxima potencia. Esa máxima potencia es el principal parámetro que define un panel solar y es uno de principales parámetros de diseño que el proyectista debe definir.

En el mercado hay paneles solares de diversas potencias máximas: 5, 30, 50, 75, 100, 150, 165 (W), etc.; según la demanda de energía que se precise. Así mismo hay paneles de diversas calidades, según las celdas cristalinas de silicio semiconductor de las que están formados sean monocristalinas (las más eficientes y caras), policristalinas (menos eficientes pero más baratas) ó amorfas (poco eficientes pero muy baratas).

En nuestro caso optaremos por la mejor calidad y una potencia intermedia; se elegirán paneles fotovoltaicos **Isofotón I-100/12**, de 100 W de potencia máxima (pico) y 12 V nominales de tensión, formados por celdas monocristalinas (36 en serie y 2 en paralelo). *Catálogo:* <http://www.isofoton.es/html/zip/I100.zip> .

El número de paneles solares **NP** necesarios se calcula del siguiente modo:

$$NP = \frac{E}{0,9 \cdot W_p \cdot HPS} \quad (3.7)$$

Donde W_p (W) es la potencia pico de cada panel solar (100 W).

Como se puede ver en la tabla 3.2, los valores de las horas de pico solar varían cada mes, luego como la casa sólo se ocupa permanentemente en el periodo comprendido entre mayo y septiembre, calcularemos el número de paneles necesarios para los dos meses límite de ese intervalo de ocupación, según la ecuación 3.7:

$$NP_{\text{may}} = \frac{1.845}{0,9 \cdot 100 \cdot 5,532} = 3,70 \approx 4 \quad (3.8)$$

$$NP_{\text{sep}} = \frac{1.845}{0,9 \cdot 100 \cdot 5,560} = 3,68 \approx 4 \quad (3.9)$$

Se considerará, a efectos de diseño, un número de paneles **NP** de 4.

Como comprobación del funcionamiento adecuado de los paneles propuestos, calcularemos el factor de utilización o cobertura solar del mes i (F_i) de la instalación. Este factor es la relación entre la energía fotovoltaica disponible y la consumida.

$$F_i = \frac{\text{Energía disponible}}{\text{Energía consumida}} = \frac{NP \cdot 0,9 \cdot W_p \cdot HPS_i}{E} \quad (3.10)$$

Los resultados obtenidos a partir de la ecuación 3.10, se muestran a continuación:

Tabla 3.3 – Factor de cobertura solar, F (-)

MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
F	0,53	0,70	0,97	0,98	1,08	1,15	1,19	1,16	1,08	0,84	0,58	0,44	0,89

Luego podemos comprobar que cumplimos plenamente con la demanda energética necesaria durante los meses de ocupación (mayo – septiembre), logrando un factor de cobertura medio anual cercano al 90 %.

Los paneles se situarán en el tejado de la vivienda, la superficie ocupada por estos será de 3,42 m². Se orientarán al sur, (a lo sumo se permitirían tolerancias de

20° hacia el oeste ó el este) y con una inclinación lo más cercana a posible a 34° (el óptimo para la latitud estudiada). La vertiente de tejado que vierte a la fachada principal (orientación Sur y 40° de inclinación) cumple con los anteriores requisitos, por lo que se situarán sobre este. Se utilizará un bastidor de acero galvanizado para fijar los paneles al tejado.

Una vez definido el generador fotovoltaico, deberemos calcular el regulador de carga necesario, para ello simplemente multiplicaremos la intensidad de cortocircuito de cada panel, obtenida del catálogo, por el número de paneles en paralelo necesarios. Ese producto será la máxima intensidad nominal a la que trabajará el regulador, $I_{\text{máx}}$ (A):

$$I_{\text{máx}} = 6,54 \cdot 4 = 26,16 \text{ A} \quad (3.11)$$

Emplearemos dos reguladores de 12 A en paralelo (cada uno actuando sobre dos paneles) modelo **Steca Solarix Gamma**. *Catálogo:* [http://www.stecasolar.com/data/media/0003123_0000002_Produktkatalog_2005_PV ES_Seite-19.pdf](http://www.stecasolar.com/data/media/0003123_0000002_Produktkatalog_2005_PV_ES_Seite-19.pdf).

Por último seleccionaremos el inversor necesario. Para ello debemos estimar la potencia instantánea máxima que la instalación va a demandar.

Analizando la tabla 3.1, vemos que esta puede llegar a ser de unos 650 W.

No obstante, si se tiene el buen hábito energético de utilizar la lavadora en horario diurno, cuando no es necesario el empleo de luz artificial, podemos comprobar que con 500 W es suficiente. Luego en consecuencia seleccionaremos un inversor que pueda hacer frente a ese valor, dando además un margen de seguridad para posibles conexiones adicionales que exijan un pico de demanda mayor. Tendremos presente que los inversores son equipos con bajo rendimiento a bajas cargas de trabajo, por lo que no es de utilidad aplicar un gran sobredimensionado en su elección.

El equipo seleccionado es el **Isofotón Isoverter 500/12**, de 500 W nominales, el cual permite según catálogo, picos de 600 W durante un máximo de 10 minutos ó de 750 W en 60 segundos. *Catálogo:* <http://www.isofoton.es/html/zip/i5060.zip> .

El cableado a la intemperie entre los paneles solares y el resto de equipos de la instalación (que se situarán en el ático de la vivienda) se realizará en cable para exteriores de una sección de 10 mm², con recubrimiento de PVC antillama.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

El coste total estimado para el conjunto de la instalación, llave en mano, es de **5.200 €**

Tabla 4.1 – Inversión

Paneles solares (€)	3.200
Bastidor paneles (€)	160
Batería (€)	300
Reguladores de carga (€)	160
Inversor (€)	750
Cableado (€)	200
Proyecto, dirección, instalación (€)	400
Inversión bruta (€)	5.200
Subvención (€)	-1.200
Inversión neta (€)	4.000

Dado que la instalación sobre la que se está realizando el estudio se localiza en La Rioja y se ubica sobre una segunda residencia (y no una residencia permanente), y haciendo de la Orden de 31 de mayo de 1996, de la Consejería de Hacienda y Promoción Económica de La Rioja sobre: “Fomento de uso de energías alternativas para electrificación autónoma de núcleos rurales aislados”, publicada en el Boletín Oficial de La Rioja nº 79, de fecha 27 de Junio de 1996, se puede incluir una partida adicional de ayuda autonómica a la inversión (a fondo perdido), de 1.202,02 €. La solicitud de subvención podrá cursarse a partir del 1 de enero y hasta el 30 de junio.

La financiación del proyecto se hará a través de ayudas y líneas de financiación ICO-IDAE (<http://www.idae.es/doc/CaracterísticasICOIDAE.pdf>).

Las ayudas del IDAE para la tipología del proyecto estudiado de instalación fotovoltaica aislada: (http://www.idae.es/doc/AnexosICOIDAE20052_13024.doc) ascienden a 375 € por cada 1.000 € de financiación ICO solicitada. Esta ayuda se aplicará a la amortización anticipada parcial del préstamo, disminuyendo el principal pendiente.

La financiación ICO, del 80 % como máximo del valor de la inversión a acometer, se corresponde con un tipo de interés variable referenciado a *euribor* a seis meses más hasta el 1 %, revisable semestralmente. La amortización se realizará hasta en diez años, incluido uno de carencia del principal.

La solicitud podrá cursarse con alguna de las siguientes entidades colaboradoras: (http://www.idae.es/doc/ListadoEntidadesFinancierasAdheridas3_19820.pdf) y en ningún caso las mismas cobrarán ningún tipo de comisión por financiar el proyecto. Podrá ser entregada a partir del 1 de junio y hasta el 30 de septiembre.

En éste estudio, se considerará una financiación mediante crédito del 80 % de la inversión, a amortizar en 8 años. El *euribor* se ha considerado igual a 3,25 para el año 2006 y por simplificar, supondremos un incremento anual del mismo de 0,3 puntos porcentuales. El tipo de interés empleado es el máximo posible (*euribor* + 1 %), para incluir una dotación al riesgo. No se considerará el año de carencia del principal.

Consideraremos un sistema de crédito de anualidad constante, pero para hacer frente al cambio del tipo de interés anual, se replanteará toda la operación de equivalencia ante cada cambio del tipo.

El cuadro de capitalización del préstamo sería:

Tabla 4.2 – Cuadro de capitalización

Capital propio (€)	800
Préstamo (€)	3.200
Total inversión (€)	4.000
Préstamo (€)	3.200
Ayuda IDAE (€)	-1.200
Endeudamiento (€)	2.000

El cuadro de amortización de la instalación sería el siguiente:

Tabla 4.3 – Cuadro de amortización

AÑO	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Capital pendiente (€)	2.000	1.787	1.567	1.338	1.098	846	580	299	0
Amortización (€/año)	-	213	220	229	240	252	266	281	299
Intereses (€/año)	-	91	87	81	73	63	51	37	20
Anualidad (€/año)	-	304	307	310	313	315	317	318	319