

Diseño simplificado de una instalación fotovoltaica autónoma.

1. Introducción.

En el cálculo completo y exhaustivo de una instalación fotovoltaica existen muchas variables que tienen que tomarse en cuenta. Este sistema de cálculo simplificado parte del supuesto que la energía media diaria solicitada por la instalación se mantiene constante a lo largo de todos los meses. Un cálculo más complejo requeriría la información del consumo medio diario para cada uno de los meses y el valor de la radiación media diaria. El cálculo extendido ha sido desechado puesto que excede del nivel de dificultad del curso. Con el cálculo simplificado obtenemos un valor aproximado válido para la mayoría de las instalaciones autónomas.

2. Determinación de la energía eléctrica diaria requerida.

En este apartado debe realizarse la estimación, para el mes más desfavorable, de la energía que necesitara la instalación para su funcionamiento. Si el uso es todo el año se deberá elegir el mes de menor radiación, así mismo, si el aprovechamiento es en verano o invierno deberá ser elegido el mes de menor radiación considerándose los meses Diciembre, Enero, Febrero y Junio Julio y Agosto como los meses de Invierno y verano respectivamente.

La instalación podrá disponer tanto de consumo en corriente continua como de consumo en corriente alterna o ambos.

Primeramente deberá ser realizado un inventario de todos los consumos, agrupando los que se alimentan en corriente continua por una parte y los que lo hacen en corriente alterna, por otra. Para hacer dicho inventario se llenara una tabla como la siguiente:

Tipo de aparato	Cantidad (n)	Potencia (W)	Horas de funcionamiento diarias (h)	Energía consumida $E = \text{Potencia} \times \text{horas} \times n$ (Wh)
				Suma total de todos los consumos

Dispondremos de dos tablas, una para corriente continua y otra idéntica para corriente alterna. La siguiente tabla recoge los consumos de aparatos comunes de uso domestico, debiéndose tomar como valores orientativos. Si es posible se tienen que tomar los valores reales de potencia de los aparatos y las horas de funcionamiento que realiza el cliente.

Tipo de aparato	Potencia (W)	Energía en (Wh)	Tiempo diario medio de funcionamiento orientativo (h)
Televisor en color	50-150		
Radiocasette	5-50		
DVD	5-30		
Lavadora	400-2200		1-2
Plancha	1000-2000		0,25
Ordenador	100-300		
Portátil	40-60		
Frigorífico	70-200		4
Congelador	90-150		5
Pequeños electrodomésticos	50-500		0,25
Herramientas eléctricas	200-1000		
Secador del pelo	500-2000		
Cocina eléctrica	2000-7000		

Horno eléctrico	1500-2500		
Freidora eléctrica	1000-2000		
Aspirador	300-1600		
Microondas	500-1000		
Cafetera eléctrica	800-1200		
Lavadora temperatura media		850-1500/ciclo	
Lavavajillas 12 servicios		1000-2000/ciclo	
Secadora		3000-4000/ciclo	
Nevera+Congelador 350 L		1000-1500/día	
Teléfono inalámbrico		150/día	

Tendremos finalmente los siguientes valores:

E_{CC} : Promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por los aparatos de corriente continua, expresada en Wh/día.

E_{CA} : Promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por los aparatos de corriente alterna, expresada en Wh/día.

Una vez que conocemos estos valores debe calcularse el consumo medio total diario de energía eléctrica, E_{elec} con la siguiente ecuación.

$$E_{elec} = (100 + F_s) E_{CC}/100 + (100 + F_s) E_{CA}/\eta_{inv} \quad (\text{Wh / día}) \quad (1)$$

Donde:

E_{elec} : Energía eléctrica total media diaria (Wh / día).

F_s : Factor de seguridad en tanto por ciento. Incluye las pérdidas en las conexiones, pérdidas en los conductores, aumentos imprevistos de consumo de los receptores, etc. El valor comúnmente más usado es del 15%, pudiéndose elegir cualquier valor entre 1,1 y 1,25.

η_{inv} : Rendimiento del inversor utilizado en tanto por ciento. En diseños preliminares y en ausencia de información más precisa puede utilizarse un valor del 85%.

3. Determinación del promedio de la radiación diaria disponible.

Una vez que hemos determinado el peor mes (el que tenga un valor menor de radiación) transformamos el valor de la tabla a unidades de kWh / m² día con los siguientes factores de conversión:

Si la tabla viene expresada en kJ / m² día multiplicar por 0,000278

Si la tabla viene expresada en MJ / m² día multiplicar por 0,2778

Si la tabla viene expresada en kcal / m² día multiplicar por 0,001163

Con esto ya tendremos el valor de Horas Solar Pico. H_s

4. Elección del tipo y número de paneles fotovoltaicos.

Elegimos un panel fotovoltaico. Cuanto mayor sea una instalación mayor potencia pico deberán tener los paneles fotovoltaicos elegidos.

Aplicamos la siguiente ecuación:

$$N_{mod} = 1,1 E_{elec} / (H_s P_{mod}) \quad (2)$$

Donde:

N_{mod} : Numero mínimo de módulos necesarios.

E_{elec} : Energía eléctrica total media diaria (Wh / día) resultado del calculo (1).

H_s : Horas Solar Pico (h). Resultado del punto 3.

P_{mod} : Potencia pico de modulo (W)

1,1 es un factor de sobredimensionamiento que corresponde al 10% y que se incluye en la mayoría de las instalaciones. Es debido a que los componentes de la instalación se degradan con el tiempo y también sirve para cubrir el exceso de temperatura de los paneles.

El valor que obtengamos de N_{mod} deberá ser redondeado al alza al número entero más próximo.

Llegados a este punto deberá de haberse establecido la tensión de trabajo del sistema VT. Si la tensión del trabajo del sistema es de por Ej. 12 V tanto los paneles como el regulador y las baterías deberán trabajar con esta tensión.

Como norma orientativa cabe decir que la tensión de trabajo puede elegirse de 12 V para sistemas cuya potencia máxima sea inferior a 4000 W y 24 V para sistemas de mayor potencia. Siempre quedara en manos del proyectista la elección adecuada de este valor. Si elegimos valores altos las secciones podrán ser mas pequeñas pero el coste de los aparatos electrónicos será como norma general mayor conforme aumente la tensión. Por lo tanto, deberá elegirse un valor de compromiso entre calidad y coste de la instalación.

Calculamos el número de módulos conectados en serie:

$$N_{S,mod} = V_T / V_{mod} \quad (3)$$

Donde:

$N_{S,mod}$: Numero de módulos que tienen que conectarse en serie.

V_T : tensión de trabajo del sistema fotovoltaico.

V_{mod} : tensión de un modulo fotovoltaico.

La ecuación (3) siempre debe dar un número entero sin decimales. En caso contrario debemos elegir otro valor de la tensión de trabajo, siendo los más comunes de 12V, 24V y 48V.

Calculamos el número de ramas conectadas en paralelo:

$$N_{P,mod} = N_{mod} / N_{S,mod} \quad (4)$$

Donde:

$N_{P,mod}$: Numero de ramas conectadas en paralelo.

N_{mod} : Numero de módulos. Resultado redondeado de la ecuación (2).

$N_{S,mod}$: Numero de módulos conectados en serie. Resultado de la ecuación (3).

El resultado de la ecuación (4) siempre tiene que dar un valor entero sin decimales. En caso de obtener un valor decimal redondeamos al alza siempre.

Por ultimo ya podemos obtener el valor total de módulos con la siguiente ecuación:

$$N_{TOTAL} = N_{S,mod} N_{P,mod} \quad (5)$$

El resultado de (5) es un valor entero siempre y es el número de módulos totales que necesita la instalación.

Si los resultados no son satisfactorios puede replantearse el calculo y elegir otro tipo de panel, volviendo de nuevo al apartado 4.

5. Dimensionado del banco de baterías.

La siguiente ecuación nos da el valor mínimo de capacidad que debe tener el banco de baterías.

$$C_T \geq 1,1 (N_D E_{elec}) / (P_{D,max} V_T) \quad (6)$$

Donde:

C_T : Capacidad mínima del banco de baterías expresada en Ah.

N_D : Días de autonomía. La cantidad de días que la instalación puede alimentarse solo de las baterías. Suele tener un valor comprendido entre 3 y 10.

E_{elec} : Energía eléctrica total media diaria (Wh / día) resultado del calculo (1).

$P_{D,max}$: Profundidad máxima de descarga profundo u ocasional, expresada en tanto por uno. Para baterías de plomo-ácido puede valer entre 0,6 y 0,8. Para acumuladores de NiCd (Niquel-Cadmio puede valer 1.

V_T : tensión de trabajo del sistema fotovoltaico elegida por el proyectista.

Debe comprobarse que la capacidad de las baterías sea superior a la mínima necesaria para que las baterías no se descarguen diariamente más de la profundidad de descarga diaria o superficial admisible, $P_{D,diaria}$, a fin de evitar que se produzcan ciclos de descarga diarios superiores a los admitidos por el tipo de baterías empleadas.

Se debe cumplir:

$$C_T \geq E_{elec} / (P_{D,diaria} V_T) \quad (7)$$

Donde:

$P_{D,diaria}$: Profundidad máxima de descarga diaria o superficial admisible, en tanto por uno. Para baterías de plomo-ácido suele valer 0,2 y para baterías de NiCd puede valer 1.

Si no se cumple la condición (7) el valor mínimo de baterías necesarias corresponde con el valor que hemos obtenido en (7).

Para asegurar una adecuada carga de las baterías, la capacidad nominal del acumulador en Ah no excederá en 25 veces la corriente de cortocircuito total del campo fotovoltaico en A.

Todos los elementos acumuladores deben ser del mismo tipo e idénticas características y funcionar en las mismas condiciones. Cuando se conectan acumuladores en serie, se suman las tensiones, y la capacidad total obtenida es igual a la capacidad individual de uno de los acumuladores. Cuando se conectan en paralelo la capacidad total es la suma de las capacidades individuales debiendo de ser de la misma tensión todos los acumuladores que se conectan en paralelo.

Se deben de evitar en la medida de lo posible la conexión de baterías en paralelo.

En número de elementos acumuladores individuales (también llamados vasos) que deben conectarse en serie se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N_{S,acu} = V_T / V_{acu} \quad (8)$$

Donde:

$N_{S,acu}$: Numero acumuladores idénticos que deben conectarse en serie.

V_T : tensión de trabajo del sistema fotovoltaico.

V_{acu} : tensión de cada acumulador. Si se trata de plomo-ácido y son vasos acumuladores la tensión vale 2V y si se utilizan baterías monoblock es la tensión de estas baterías (6V, 12V, 24V valores típicos).

En el caso que sea necesario conectar acumuladores en paralelo se calculan con la siguiente ecuación:

$$N_{P,acu} = C_T / C \quad (9)$$

Donde:

$N_{P,acu}$: Numero en paralelo de acumuladores.

C_T : Capacidad total del banco de baterías en Ah.

C : Capacidad individual de un acumulador.

Si en (9) obtenemos un valor decimal deberemos redondear al alza.

Como se recordara deberá evitarse en la medida de lo posible conectar acumuladores en paralelo. La conexión de acumuladores en paralelo puede resultar en pérdidas de energía en el banco de baterías.

Por ultimo, el valor total de acumuladores que deberemos comprar se obtiene:

$$N_{TOTAL} = N_{S,acu} N_{P,acu} \quad (10)$$

6. Calculo del regulador necesario.

Los parámetros más importantes del regulador son su tensión de trabajo y la máxima corriente que soporta.

La tensión de trabajo del regulador deberá ser la misma que la tensión de trabajo del sistema. VT.

Para calcular la máxima corriente que debe soportar el regulador aplicamos la siguiente ecuación:

$$I_{REG} = 1,1 I_{SC,mod} N_{P,mod} \quad (11)$$

Donde:

I_{REG} : Corriente máxima que debe soportar el regulador.

$I_{SC,mod}$: Corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico. Viene en las especificaciones o *datasheet* del panel.

$N_{P,mod}$: Numero de ramas conectadas en paralelo. Resultado del calculo (4)

1,1 es un factor de sobredimensionamiento mas comúnmente utilizado. Corresponde al 10%. Pueden ser elegidos otros valores diferentes. Por Ej. 1,25 para instalaciones con seguridad reforzada que corresponde a un 25%.

Del resultado de (11) deberemos elegir un valor comercializado inmediatamente superior.

La tensión máxima que debe soportar el regulador se calcula con:

$$V_{REG,max} = 1,1 V_{OC,mod} N_{S,mod} \quad (12)$$

Donde:

$V_{REG,max}$: voltaje máximo que debe soportar el regulador.

$V_{OC,mod}$: Voltaje *open circuit* de un panel fotovoltaico. Viene en las especificaciones o *datasheet* del panel.

$N_{S,mod}$: Numero de módulos conectados en serie.

Factor de sobredimensionamiento de 1,1 correspondiente al 10% pero que también puede ser adoptado a otro valor (Ej. 1,25).

La tensión máxima que tiene que soportar el regulador ocurre cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- 1) día con irradiancia máxima y
- 2) Baterías completamente cargadas y no hay ningún aparato consumiendo corriente.

En caso que el regulador no pudiera soportar esta tensión acabaría quemándose y quemando la instalación cuando se cumpliesen esas condiciones.

7. Calculo de la potencia del inversor requerida.

Para el cálculo de la potencia requerida tenemos dos caminos posibles.

- a) Sumamos la potencia de todos los elementos de corriente alterna. Añadimos un 25% de sobredimensionamiento para cubrir situaciones no previstas. Esta es la solución cara.
- b) Aplicamos un coeficiente de simultaneidad aprox. de 40-60%. Esto quiere decir que en una instalación normal es raro que todos los aparatos se conecten al mismo tiempo. Un coeficiente de simultaneidad del 50% quiere decir que la mitad de los aparatos esta

conectada al mismo tiempo normalmente. Sumamos todas las potencias y obtenemos el tanto por ciento de ese valor que nos indique el coeficiente de simultaneidad. Es la solución más económica pero debemos informar al cliente de las limitaciones de dicha instalación.

Debe tenerse en cuenta que si existiesen en la instalación cargas especiales como los motores, (que en el momento del arranque solicitan entre 5-8 veces la corriente normal de funcionamiento) deberemos elegir un inversor capaz de arrancar este tipo de cargas.

7. Calculo de la sección de los cables de la instalación.

La sección de los conductores deberá de calcularse por tramos. Siempre intentaremos realizar la instalación con la menor distancia posible entre los elementos. El primer paso consiste en el cálculo de la intensidad máxima que deben de soportar los cables en cada tramo de la instalación.

7.1 Calculo de la intensidad máxima que debe soportar el tramo campo fotovoltaico-regulador.

Utilizamos la siguiente ecuación:

$$I_{MAX,mod} = 1,25 I_{SC,mod} N_{p,mod} \quad (13)$$

Donde:

$I_{MAX,mod}$: Corriente máxima en la línea paneles-regulador.

$I_{SC,mod}$: Corriente de cortocircuito del panel utilizado. Viene del *datasheet* del fabricante.

$N_{p,mod}$: Numero de ramas de paralelo.

El factor 1,25 es un factor de sobredimensionamiento del 25% para cubrir el exceso de corriente de cortocircuito debido al aumento de Irradiancia y Temperatura. (los paneles se pueden calentar hasta los 75°), podemos disponer de Irradiancia ocasional de 1200 W / m².

Para las secciones de cable que unen paneles en serie entre si podemos utilizar una sección menor para ahorrar costes puesto que la corriente que circula por esas líneas es menor. Para lo cual utilizamos:

$$I_{MAX,mod} = 1,25 I_{SC,mod} \quad (14)$$

7.2 Calculo de la intensidad máxima que debe soportar el tramo baterías-inversor.

Aplicamos:

$$I_{MAX,inv} = 1,25 P_{inv} / (V_{MIN,Tacu} \eta_{inv}) \quad (15)$$

Donde:

$I_{MAX,inv}$: Corriente máxima en la línea baterías-inversor.

P_{inv} : Potencia del inversor en servicio continuo. Recomendable incrementar este valor en un 25% para prever situaciones imprevistas de consumo.

$V_{MIN,Tacu}$: El menor valor de tensión de las baterías con el que puede funcionar el inversor.

η_{inv} : Rendimiento del inversor a plena potencia en tanto por uno.

Una vez que disponemos de todas las corrientes máximas sobredimensionadas en todos los tramos de la instalación para calcular la sección deberemos de tener en cuenta la caída de tensión máxima permitida que vamos a aplicar. Es un valor que puede estar comprendido entre 0,5% y 3% y que el proyectista deberá de decidir, siempre encontrando un equilibrio entre coste y aprovechamiento de la instalación.

Como datos orientativos podemos aplicar las siguientes caídas de tensión máximas permitidas y recomendadas:

Tramo Paneles / Regulador = 3 % recomendada 1%.

Tramo regulador / batería = 1 % recomendada 0,5%.

Tramo inversor / batería = 1 % recomendada 1%.
 Tramo regulador inversor = 1 % recomendada 1%.
 Tramo Líneas iluminación = 3 % recomendada 3%.
 Otros equipos = 5% recomendada 3%.

Primero calcularemos la caída de tensión en voltios para cada tramo aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta V = V_T V_{\text{Caída}\%} / 100 \quad (16)$$

Donde:

ΔV : Caída de tensión máxima permitida para cada tramo (V).

V_T : tensión de trabajo del sistema (V).

$V_{\text{Caída}\%}$: Caída de tensión en tanto por ciento elegida para cada tramo.

Eligiendo para cada tramo el valor adecuado aplicamos en todos los tramos la siguiente ecuación:

$$S_{\text{CABLE}} = 2 \rho L I_{\text{MAX}} / \Delta V \quad (17)$$

Donde:

S_{CABLE} : Sección mínima recomendada en mm^2 .

ρ : Resistividad del metal usado como conductor, para el cobre vale $0,018$ ($\Omega\text{mm}^2 / \text{m}$).

L : Longitud tramo. (m).

I_{MAX} : Corriente máxima para cada tramo de la instalación calculada previamente.

ΔV : Caída de tensión máxima permitida para cada tramo. (V) Resultado del calculo (16).

La tabla siguiente muestra una relación de resistividades siendo las más utilizadas en las instalaciones fotovoltaicas el cobre y el aluminio.

Tipo de material conductor	Resistividad (en $\Omega\text{mm}^2 / \text{m}$)
Plata	0,016
Cobre	0,018
Aluminio	0,030
Cinc	0,06
Latón	0,75
Platino	0,108