

Curso de Energía Solar Fotovoltaica

CIEMAT

Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos

Jorge Aguilera, Leocadio Hontoria
GRUPO IDEA. DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA.
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE JAÉN

Curso de Energía Solar Fotovoltaica
CIEMAT

Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Jorge Aguilera, Leocadio Hontoria
Departamento Electrónica. EPS Jaén – UNIVERSIDAD DE JAÉN

Contenido

1. Introducción
 2. Diseño versus dimensionado
 3. Métodos de dimensionado
 4. Método propuesto para dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos
 5. Ejemplo 1. Consumo constante anual
 6. Ejemplo 2. Consumo solo parte del año
 7. Resumen
 8. Conclusiones
-

1. Introducción

Según su funcionamiento con relación a una red eléctrica convencional existen dos tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos: de una parte están los denominados sistemas fotovoltaicos conectados (o enganchados) a red (SFCR), que, como se puede deducir por su nombre, necesitan de la conexión a una red eléctrica para realizar su función generadora de electricidad. Por otra parte están los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), que al contrario de los anteriores, no necesitan de una conexión con una red eléctrica, y su funcionamiento es independiente o autónomo de dicha red (de ahí su nombre). Los SFA fueron anteriores en el tiempo a los SFCR, y, aunque si bien estos últimos están consiguiendo un crecimiento muy importante, sobre todo en los países que cuentan con un amplio desarrollo de redes eléctricas en todo su territorio, los SFA siguen siendo los más empleados en países con poco desarrollo industrial, en zonas rurales, lugares remotos y poco accesibles, etc.

En las tres siguientes figuras se muestran los esquemas de tres tipos de sistemas fotovoltaicos muy típicos. El primero de ellos es un SFA con cargas sólo de corriente continua. El segundo de ellos es muy similar al anterior pero que incluye cargas de corriente alterna también. Y el tercero es un ejemplo de SFCR.

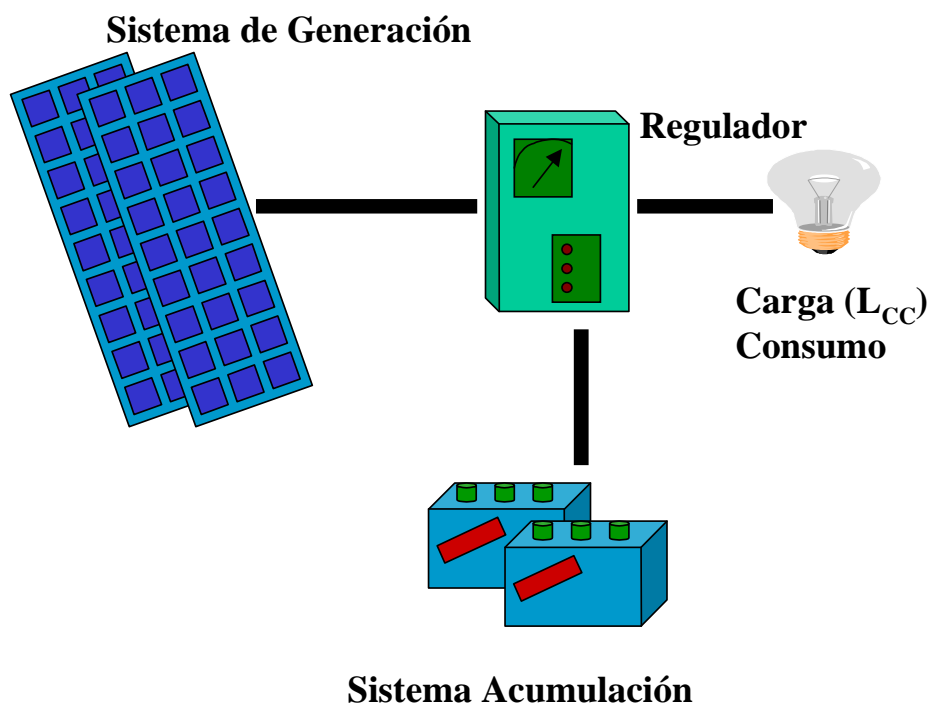


Figura 1. Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA). Sólo cargas DC.

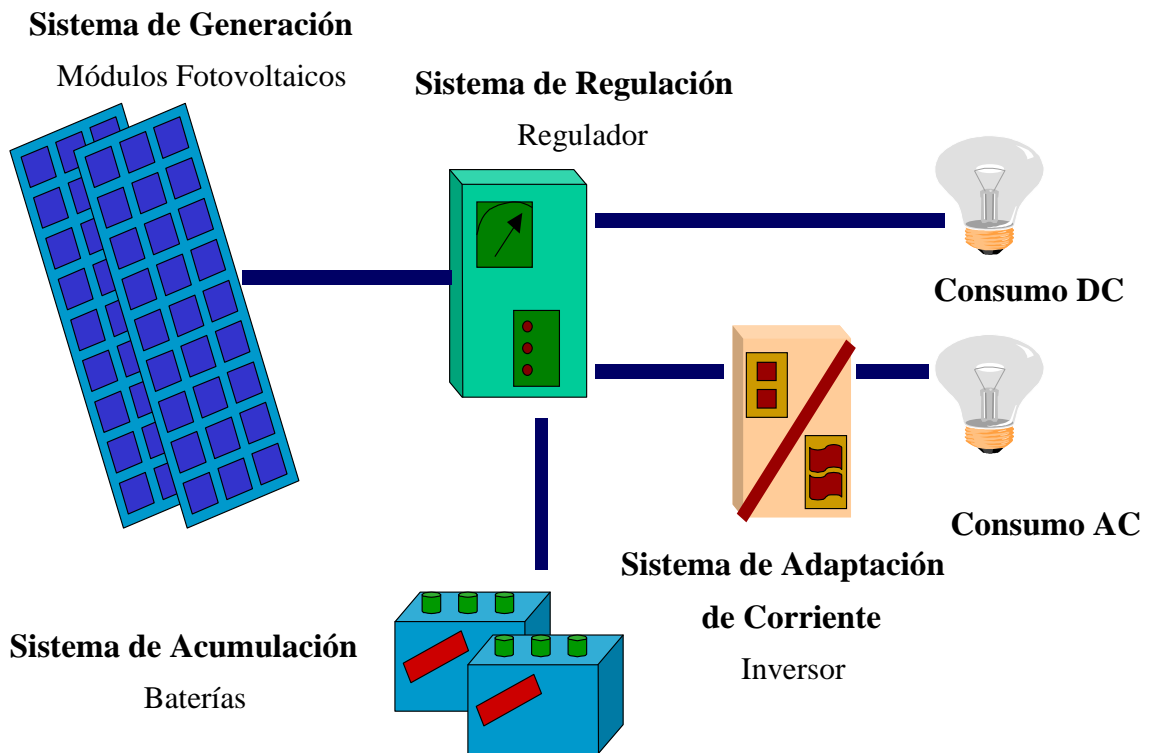


Figura 2. Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA). Cargas DC y Cargas AC.

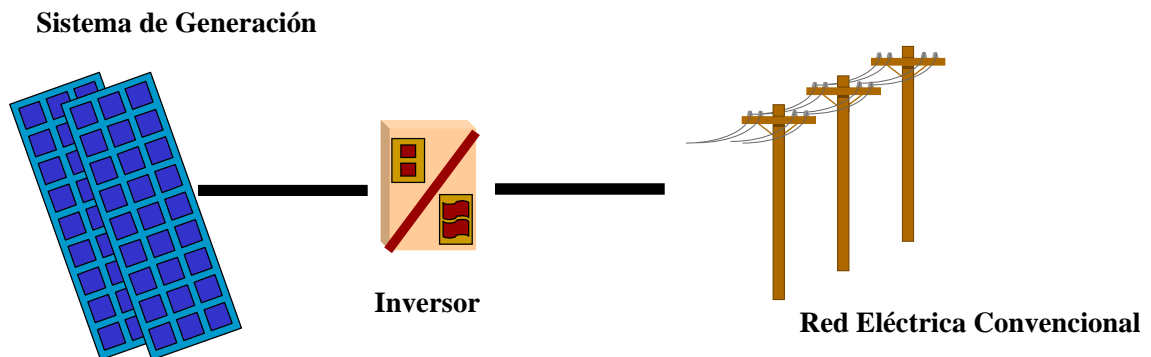


Figura 3. Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR)

En el presente capítulo se va a presentar un método de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos. Se supondrá el esquema de la figura 2, el SFA con cargas tanto en corriente continua como alterna.

2. Diseño versus dimensionado

Por diseño de un sistema fotovoltaico autónomo se entiende un concepto muy amplio que abarcaría a todas las tareas y especificaciones que se han de realizar y tener en cuenta para que un sistema fotovoltaico funcione satisfactoriamente, con la mayor fiabilidad y al menor coste posible. En este sentido existirán una gran multitud de factores que afectarán a este diseño como son entre otros el consumo o perfil de consumo de las cargas que vaya a

alimentar la instalación fotovoltaica y la radiación solar del lugar donde se ubicará la instalación, principalmente.

El concepto de dimensionado sería un concepto menos amplio y estaría incluido entre las tareas del diseño. Se entiende por dimensionado de un sistema fotovoltaico el cálculo del tamaño óptimo de la instalación. La tarea fundamental del dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo con la estructura presentada en la figura 2 consistirá principalmente en la determinación del tamaño óptimo tanto del generador fotovoltaico como de la batería o conjunto de baterías que formen el sistema. Puesto que estos dos elementos son los más importantes del sistema fotovoltaico autónomo se deberá prestar especial atención a su dimensionado. En una fase posterior, y sin restarle importancia, habrá que dimensionar también los otros elementos que también participan de la instalación como son el inversor, el regulador de carga y el cableado.

3. Métodos de dimensionado

Existen gran variedad de métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Esta diversidad abarca desde métodos muy complicados y que necesitan de un programa informático para ejecutarse hasta métodos mucho más simples, que con prácticamente una calculadora de mano permiten realizar el dimensionado.

La filosofía de dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo es bastante diferente de la de un sistema fotovoltaico conectado a red. En éste último, el criterio que se suele emplear para el diseño y dimensionado es el de conseguir que a lo largo de un año el rendimiento del sistema sea lo más elevado posible o que la aportación energética anual del sistema sea máxima. Puesto que está conectado a la red eléctrica, los posibles fallos del sistema no son tan cruciales como en un sistema fotovoltaico autónomo. Por el contrario, el criterio que se sigue en el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo no es tanto el producir la máxima energía sino que aparece el concepto de fiabilidad. El dimensionado en este caso se hace atendiendo más a la fiabilidad del sistema, entendiendo por fiabilidad el asegurar el buen funcionamiento del mismo procurando que los fallos en el sistema sean mínimos. En este caso, el sistema deberá diseñarse y dimensionarse de forma que la probabilidad de fallo sea lo más baja posible, dentro de unos márgenes que se establecen según el tipo de sistema.

Una primera clasificación de métodos de dimensionado sería aquella que los clasificaría según si el método presenta alguna información sobre la fiabilidad del sistema o no. Los métodos que presentan ese tipo de información son muy preciosos, pero a su vez suelen tener otros condicionantes que los hacen más complicados de ejecutar, sobre todo si no se cuenta con un programa informático que los simule. Por otro lado, existen también diferentes métodos propuestos por diferentes autores, que aunque no dan información sobre la fiabilidad, si sirven como una buena aproximación, al menos en una primera fase del diseño que permita establecer una idea de la estructura del sistema fotovoltaico al menos grosso modo.

En este capítulo se ha pretendido presentar un método que sea comprensible por su sencillez y a la vez que sirva como primera aproximación en el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico. Se pretende con este método que cualquier usuario pueda realizar un dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo sin tener que contar con complicados cálculos que le llevarían a usar algún tipo de programa informático.

4. Método propuesto para el dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos

Como se ha comentado anteriormente, de la gran multitud de métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos que existen, se presenta para este curso uno muy sencillo, pero que a pesar de su sencillez proporciona muy buenos resultados, sobre todo muy útiles para una primera fase de diseño de una determinada instalación.

Los pasos a seguir en el dimensionado que se propone son las siguientes:

- Paso 1. Estimación del consumo
- Paso 2. Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los paneles
- Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico
- Paso 4. Dimensionado del sistema de acumulación
- Paso 5. Dimensionado del regulador
- Paso 6. Dimensionado del inversor
- Paso 7. Dimensionado del cableado

4.1. Estimación del consumo

La demanda de energía impone muchas de las características de la instalación, por lo que en la planificación de las necesidades se debe anotar todo lo relacionado con los diferentes aparatos eléctricos que serán la carga del sistema.

Se deberá calcular la energía que el usuario necesitará diariamente. Para ello se deberá determinar la potencia de todos los aparatos de que constará la instalación, individualmente, junto con el tiempo medio de uso de cada uno de ellos. En caso de duda, tanto la potencia como el tiempo medio de uso se deberán redondear hacia arriba.

Conocidos todos los aparatos, potencias y tiempos de uso la expresión para calcular la energía de consumo, distinguiendo entre los aparatos de corriente alterna y continua será:

$$E_{AC} = \sum P_{(AC)i} \cdot t_{di} \quad (1)$$

$$E_{DC} = \sum P_{(DC)i} \cdot t_{di} \quad (2)$$

Siendo:

E_{AC} : Energía consumida en AC (Wh)

E_{DC} : Energía consumida en DC (Wh)

P_i : Potencia Nominal (W)

t_{di} : Tiempo diario de uso (h)

Para calcular el consumo total, se tendrán en cuenta los rendimientos de las etapas existentes aplicando la siguiente expresión:

$$E_T = E_{DC} / \eta_{BAT} + E_{AC} / (\eta_{BAT} \eta_{INV}) \quad (3)$$

Donde:

ET: Energía real requerida por el sistema (consumo) (Wh)

η_{BAT} : Rendimiento de la batería

η_{INV} : Rendimiento del inversor

La energía real requerida ET, refleja la energía que el sistema demanda en su conjunto en un día, y es un dato importante a la hora de dimensionar el generador fotovoltaico.

4.2. Cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los módulos

Para el cálculo del ángulo óptimo de inclinación de los módulos fotovoltaicos de la instalación es necesario conocer como dato de partida, al menos la radiación solar incidente en el lugar (valores medios mensuales). Estos datos suelen referirse a superficie horizontal, por lo que por los diferentes métodos existentes se han de calcular a diferentes inclinaciones.

Se asume que para buscar el óptimo de posición de los módulos, éstos estarán orientados al sur, y sólo habrá que calcular la radiación incidente a diferentes inclinaciones. A modo de resumen se presentan las siguientes ecuaciones que pueden servir para realizar los cálculos de radiación solar incidente a diferentes inclinaciones:

Ecuaciones.

Ec 4: Factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right)$$

d_n :orden del día

Ec 5: Angulo diario (rad):

$$\Gamma = 2\pi \frac{d_n - 1}{365}$$

Ec 6: Declinación solar (rad):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma$$

Ec 7: Angulo de salida del Sol (rad):

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

ϕ : latitud del lugar

Ec 8: Radiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal (kWh/m²):

$$G_{0d} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 (\omega_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$$

I_{sc} : constante solar.

Ec 9: Índice de transparencia atmosférica:

$$K_d \equiv \frac{G_d}{G_{0d}} \left(1,39 - 4,027K_d + 5,531K_d^2 - 3,108K_d^3 \right) \quad 0,3 < K_d < 0,7$$

Ec 10: Radiación difusa en superficie horizontal (KWh/m²):

Ec 11: Radiación directa en superficie horizontal (KWh/m²):

$$I_d = G_d - D_d$$

Una vez realizados los cálculos para los 12 meses del año se habrán obtenido las componentes directas y difusas que al sumarse componen la radiación global recibida (se supone que la radiación reflejada es nula) para superficies horizontales.

A continuación se deben aplicar las ecuaciones 12 a 15 para obtener las componentes directas y difusas de la radiación global sobre superficies inclinadas un cierto ángulo β que puede tomar cualquiera de los siguientes valores: 10°, 20°, 30°, 40°, 50° y 60°.

Ec 12: Factor de conversión geométrico:

$$R_{b,\beta} = \frac{\omega_s \text{Sen}\delta \text{Sen}(\phi - \beta) + \text{Cos}\delta \text{Cos}(\phi - \beta) \text{Sen}\omega_s}{\omega_s \text{Sen}\delta \text{Sen}\phi + \text{Cos}\delta \text{Cos}\phi \text{Sen}\omega_s}$$

Ec 13: Radiación directa en superficie inclinada un ángulo β (KWh/m²):

$$I_{d,\beta} = I_d R_b$$

Ec 14: Radiación difusa en superficie inclinada un ángulo β (KWh/m²):

$$D_{d,\beta} = D_d \left[(G_d - D_d) \frac{R_b}{G_{0d}} + \frac{1}{2} (1 + \text{Cos}\beta) \frac{(G_d - D_d)}{G_{0d}} \right]$$

Ec 15: Radiación global en superficie inclinada un ángulo β (KWh/m²):

$$G_{d,\beta} = I_{d,\beta} + D_{d,\beta}$$

Lo que sigue a continuación viene a llamarse el procedimiento o método de dimensionado del *Mes Crítico* o *Mes Desfavorable*. Se prepara a continuación una tabla donde se indica la radiación incidente para las distintas inclinaciones y para los diferentes meses. A modo de ejemplo esto podría ser el resultado para una cierta localidad:

| Mes | G _d Global (KWh/m ²) | | | | | | |
|------|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | 1,385 | 1,514 | 1,584 | 1,625 | 1,636 | 1,617 | 1,569 |
| Feb | 2,036 | 2,139 | 2,176 | 2,176 | 2,139 | 2,066 | 1,960 |
| Mar | 3,062 | 3,104 | 3,078 | 3,004 | 2,882 | 2,718 | 2,516 |
| Abr | 4,040 | 4,041 | 3,970 | 3,837 | 3,647 | 3,405 | 3,119 |
| May | 4,121 | 4,109 | 4,024 | 3,872 | 3,658 | 3,387 | 3,069 |
| Jun | 4,743 | 4,702 | 4,587 | 4,399 | 4,143 | 3,828 | 3,464 |
| Jul | 4,558 | 4,526 | 4,421 | 4,244 | 4,002 | 3,701 | 3,352 |
| Ago | 4,071 | 4,075 | 4,005 | 3,870 | 3,674 | 3,423 | 3,126 |
| Sep | 3,571 | 3,584 | 3,530 | 3,421 | 3,260 | 3,053 | 2,806 |
| Oct | 2,374 | 2,467 | 2,492 | 2,474 | 2,415 | 2,316 | 2,180 |
| Nov | 1,624 | 1,744 | 1,803 | 1,829 | 1,823 | 1,785 | 1,716 |
| Dic | 1,205 | 1,342 | 1,422 | 1,476 | 1,501 | 1,499 | 1,467 |
| TOT. | 36,790 | 37,347 | 37,090 | 36,226 | 34,781 | 38,20 | 30,343 |

Conocido del apartado anterior los consumos mensuales E_T para todos los meses del año, se prepara una nueva tabla en la que se incluyan las relaciones Consumo / Radiación. Los pasos a seguir a continuación son los dos siguientes:

- Paso 1. Para cada inclinación se tomará el *Máximo* cociente, obteniendo de este modo el *Mes Crítico* para cada inclinación.
- Paso 2. Se elige de todos los mínimos anteriores el *Menor*, de forma que se maximice la captación energética solar en el *Mes Crítico*.

Por ejemplo, si el consumo fuese constante y de 2000 kWh se obtendría la siguiente nueva tabla:

| Mes | G _d / E _T | | | | | | |
|------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | 3,21 | 2,94 | 2,81 | 2,74 | 2,72 | 2,75 | 2,83 |
| Feb | 2,18 | 2,08 | 2,04 | 2,04 | 2,08 | 2,15 | 2,27 |
| Mar | 1,45 | 1,43 | 1,44 | 1,48 | 1,54 | 1,64 | 1,77 |
| Abr | 1,10 | 1,10 | 1,12 | 1,16 | 1,22 | 1,31 | 1,43 |
| May | 1,08 | 1,08 | 1,10 | 1,15 | 1,22 | 1,31 | 1,45 |
| Jun | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 1,01 | 1,07 | 1,16 | 1,28 |
| Jul | 0,98 | 0,98 | 1,01 | 1,05 | 1,11 | 1,20 | 1,33 |
| Ago | 1,09 | 1,09 | 1,11 | 1,15 | 1,21 | 1,30 | 1,42 |
| Sep | 1,24 | 1,24 | 1,26 | 1,30 | 1,36 | 1,46 | 1,58 |
| Oct | 1,87 | 1,80 | 1,78 | 1,80 | 1,84 | 1,92 | 2,04 |
| Nov | 2,74 | 2,55 | 2,47 | 2,43 | 2,44 | 2,49 | 2,59 |
| Dic | 3,69 | 3,31 | 3,13 | 3,01 | 2,96 | 2,97 | 3,03 |
| TOT. | 1,45 | 1,43 | 1,44 | 1,47 | 1,53 | 1,63 | 1,76 |

En el ejemplo que se observa de la tabla anterior, se ve que al ser consumo constante, el mes con pero radiación a su vez es el que proporciona una relación Consumo / Radiación mayor (diciembre, en negrita) y de todos ellos la inclinación para el que ese cociente es menor es de 40° (negrita y resaltado).

Una vez realizados los dos pasos anteriores se obtendrá la inclinación a la que se deberán situar los módulos fotovoltaicos. (En este ejemplo a 40°).

Este criterio de dimensionado nos asegura un correcto funcionamiento de la instalación en el mes en que la relación Consumo / Radiación es máxima. Esto es especialmente importante en las instalaciones cuyo consumo varíe y donde la garantía del suministro es más importante que el maximizar la captación energética a lo largo del año.

4.3. Dimensionado del Generador Fotovoltaico

Una vez que la demanda energética de la carga es conocida, se está en condiciones de dimensionar el generador fotovoltaico.

El número total de módulos fotovoltaicos que se deben instalar se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$N_T = E_T / (P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G) \quad (16)$$

Siendo:

E_T : Energía real requerida (Wh)

P_p : Potencia Pico del Módulo (W / kW / m²)

$G_{m\beta}$: Radiación Global sobre una superficie inclinada un ángulo β (kWh / m²)

P_G : Factor Global de Pérdidas (suele variar entre 0.65 y 0.9)

Conociendo el número de total de paneles que forman el generador fotovoltaico y la tensión nominal de la batería, que coincide con la tensión nominal de la instalación, se puede determinar si es necesario agrupar los módulos en serie y en paralelo. El número de módulos que habrá que conectar en serie, se calcula así:

$$N_s = V_{Bat} / V_m \quad (17)$$

Donde:

N_s : número de módulos en serie por rama

V_{Bat} : tensión nominal de la batería (V)

V_m : tensión nominal de los módulos (V)

Y el número de ramas en paralelo a conectar para suministra la potencia necesaria, viene dado por:

$$N_p = N_T / N_s \quad (18)$$

Siendo N_p el número de módulos a conectar en ramas paralelo.

Los valores de N_T , N_s y N_p se redondean por exceso, excepto si se aproximan mucho a las cifras por defecto, de manera que se asegure el suministro de potencia que demanda la instalación.

El ángulo de inclinación de los paneles β se calculó anteriormente con el método del mes crítico.

Tras estos cálculos estaría dimensionado el generador fotovoltaico tanto en número de módulos como en la inclinación de los mismos.

4.4. Dimensionado del Sistema de Acumulación (Batería)

Para definir el tamaño del acumulador, se deberán tener en cuenta los siguientes parámetros:

- *Máxima Profundidad de Descarga*: es el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador, para proteger la duración de la misma. En baterías estacionarias de plomo-ácido un valor adecuado de este parámetro es de 0.7
- *Días de Autonomía*: es el número de días consecutivos que en ausencia de sol, el sistema de acumulación es capaz de atender el consumo, sin sobrepasar la profundidad máxima de descarga de la batería. Los días de autonomía posibles, dependen entre otros factores del tipo de instalación y de las condiciones climáticas del lugar.

La capacidad de las baterías es la cantidad de energía que debe ser capaz de almacenar, para asegurar los días de autonomía. Las expresiones que se utilizan para hallar la capacidad de la misma, tanto en Wh (vatios hora) como en Ah (amperios hora) son:

$$C_n (Wh) = E_T \cdot N / P_d \quad C_n (Ah) = C_n (Wh) / V_{bat} \quad (19.a) \text{ y } (19.b)$$

Siendo:

C_n: capacidad nominal de la batería (Wh ó Ah)

E_T: Energía real requerida (Wh)

P_d: Máxima Profundidad de descarga de la batería

V_{Bat}: tensión nominal de la batería (V)

Es importante señalar que los periodos de autonomía cortos, alargan la vida de las baterías y dan al sistema mayor fiabilidad.

La batería se elegirá de forma que se aproxime al valor de capacidad nominal C_n calculado. Igualmente se tenderá a elegir la batería redondeando el valor C_n por exceso para obtener mejor margen de seguridad.

4.5. Dimensionado del Regulador

El regulador es el elemento que controla las cargas y descargas de la batería, permitiendo el proceso de carga de la misma desde el generador fotovoltaico y el proceso de descarga a través de los elementos de consumo eléctrico del sistema global.

A la hora de dimensionar un regulador, el objetivo principal es obtener la corriente máxima que va a circular por la instalación. Por lo tanto, se habrá de calcular la corriente que produce el generador, la corriente que consume la carga, y la máxima de estas dos corrientes será la que deba soportar el regulador en funcionamiento.

La corriente de corte a la que debe actuar el regulador será fijada en el propio dispositivo, pero ha de soportar la máxima posible que la instalación pueda producir.

La intensidad de corriente que produce el generador es la suma de las intensidades que producen los módulos funcionando a pleno rendimiento:

$$I_G = I_R \cdot N_R \quad I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m \quad (20.a) \text{ y } (20.b)$$

Siendo

I_G : Corriente producida por el generador (A)

I_R : Corriente producida por cada rama en paralelo del generador (A)

N_R : Número de ramas en paralelo del generador

P_p : Potencia Pico del módulo fotovoltaico (W)

η_m : Rendimiento del módulo

V_m : Tensión nominal de los módulos (V)

La intensidad que consume la carga se determina teniendo en cuenta todos los consumos al mismo tiempo:

$$I_C = P_{DC} / V_{bat} + P_{AC} / 220 \quad (21)$$

Donde:

I_C : Corriente que consume la carga (A)

P_{DC} : Potencia de las cargas en DC (W)

V_{bat} : Tensión nominal de la batería (V)

P_{AC} : Potencia de las cargas en AC (W)

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

$$I_R = \max(I_G, I_C) \quad (23)$$

4.6. Dimensionado del Inversor

Las características de funcionamiento que definen un inversor o convertidor DC –AC son:

- Potencia Nominal (kW)
- Tensión Nominal de Entrada (V)
- Tensión Nominal de Salida (V)
- Frecuencia de operación (HZ)
- Rendimiento (%)

La tensión de entrada en el inversor de una instalación fotovoltaica no será siempre constante, por lo que el inversor debe ser capaz de transformar distintas tensiones continuas dentro de un determinado rango. Ese rango suele ser de un 15 %.

El valor de la tensión nominal es un dato de referencia dentro del intervalo de actuación que sirve para identificar el tipo de convertidor.

A la hora de dimensionar el inversor se tendrá en cuenta la potencia que demanda la carga AC, de forma que se elegirá un inversor cuya potencia nominal sea algo superior a la máxima

demandada por la carga. Sin embargo, se debe evitar el sobredimensionamiento del inversor para tratar de hacerlo trabajar en la zona donde presenta mejores eficiencias.

Se puede resumir la potencia del inversor con esta expresión

$$P_{inv} \approx P_{AC} \quad (24)$$

4.7. Dimensionado del Cableado

El dimensionado del cableado constituye una de las tareas en las que se deberá prestar especial atención, ya que siempre que exista consumo habrá pérdidas debido a las caídas de tensión en los cables.

Estas pérdidas óhmicas deben cumplir la más restrictiva de las dos condiciones siguientes:

1. Verificar las normas electrotécnicas de baja tensión
2. La pérdida de energía debe ser menor que una cantidad prefijada.

Su valor puede calcularse con las siguientes expresiones:

$$P_{PC} = I^2 \cdot R_C \quad R_C = \rho \cdot L / S \quad (25.a) \quad (25.b)$$

Siendo:

P_{PC} : Potencia de Pérdidas en los conductores (W)

I: Corriente que circula por los conductores (A)

R_C : Resistencia óhmica de los conductores (Ω)

ρ : Resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

L: Longitud de los conductores (m)

S: Sección de los conductores (mm^2)

5. Ejemplo 1

Se va a dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo con las siguientes características:

- * Perfil de consumo Constante Anual
- * Ubicación: Oviedo.
- * Equipos en continua (DC):

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. |
|-------------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Iluminación habitaciones | 20 | 4 | 2 |
| Iluminación salón | 40 | 2 | 4 |
| Iluminación Cocina | 40 | 1 | 3 |
| Iluminación Cuartos de baño | 30 | 2 | 2 |
| Iluminación Exterior Vivienda | 40 | 2 | 2 |
| Teléfono | 20 | 1 | 5 |
| Motor de extracción de agua | 743 | 1 | 0,7 |

- * Equipos en alterna (AC):

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. |
|------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Lavadora | 380 | 1 | 0,5 |
| Vídeo | 30 | 1 | 5 |
| Televisor color | 100 | 1 | 2 |
| Radiocasete | 5 | 1 | 2 |
| Frigorífico | 90 | 1 | 3 |
| Congelador | 110 | 1 | 4 |
| Ordenador | 80 | 1 | 3 |

- * Eficiencia de la Batería:..... 95 %
- * Eficiencia del inversor: 90 %
- * Máxima profundidad de descarga: 60 %
- * N° de días de autonomía: 6
- * Tensión Nominal de la Batería..... 24 V

Latitud de Oviedo: $\phi = 43,35^\circ$

Radiación global media mensual sobre superficie horizontal para cada mes del año:

| Oviedo | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | Media |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Gd Wh/m ² | 1.385 | 2.038 | 3.062 | 4.040 | 4.121 | 4.743 | 4.558 | 4.071 | 3.571 | 2.374 | 1.624 | 1.205 | 3.066 |

Características de los módulos a emplear:

I-106. Potencia 106 W. $I_{sc} = 6.54$ A. $V_{oc} = 21.6$ V. $I_{max} = 6.1$ A. $V_{max} = 17.4$ V.

5.1. Paso 1. Estimación de consumos

Los consumos en continua son los siguientes:

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. | Consumo (Wh/día) |
|-------------------------------|--------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Iluminación habitaciones | 20 | 4 | 2 | 160 |
| Iluminación salón | 40 | 2 | 4 | 320 |
| Iluminación Cocina | 40 | 1 | 3 | 120 |
| Iluminación Cuartos de baño | 30 | 2 | 2 | 120 |
| Iluminación Exterior Vivienda | 40 | 2 | 2 | 160 |
| Teléfono | 20 | 1 | 5 | 100 |
| Motor de extracción de agua | 743 | 1 | 0,7 | 520,1 |
| CONSUMO TOTAL DC | | | | 1.500 |

Los consumos en alterna son los siguientes:

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. | Consumo (Wh/día) |
|-------------------------|--------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Lavadora | 380 | 1 | 0,5 | 190 |
| Vídeo | 30 | 1 | 5 | 150 |
| Televisor color | 100 | 1 | 2 | 200 |
| Radiocasete | 5 | 1 | 2 | 10 |
| Frigorífico | 90 | 1 | 3 | 270 |
| Congelador | 110 | 1 | 4 | 440 |
| Ordenador | 80 | 1 | 3 | 240 |
| CONSUMO TOTAL AC | | | | 1.500 |

Es decir:

$$E_{DC} = 1500 \text{ W h/día}$$

$$E_{AC} = 1500 \text{ Wh /día}$$

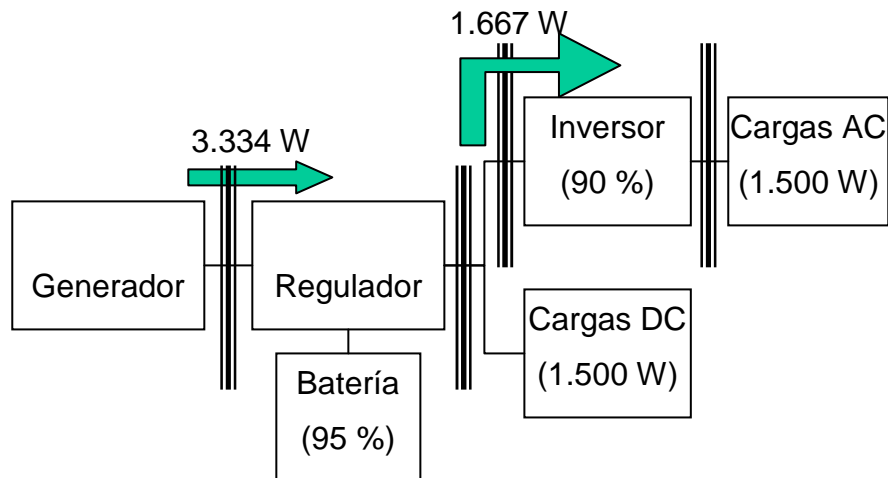
Recordamos que las eficiencias de la batería y del inversor influyen en el cálculo de la energía total necesaria. Si se tiene en cuenta el esquema básico de un SFVA con cargas DC y AC como el que se muestra a continuación, se puede comprobar como la eficiencia del inversor solamente afecta al consumo AC.

La energía consumida al día es:

$$E_T = E_{DC} / \eta_{BAT} + E_{AC} / (\eta_{BAT} \cdot \eta_{INV})$$

$$E_T = 1500 / 0.95 + 1500 / (0.95 \cdot 0.90) = \mathbf{3334 \text{ Wh /día}}$$

Esto se puede resumir en el siguiente esquema:



Se puede comprobar como en vez de necesitar 3.000 Wh/día se precisan 3.334 Wh/día.

5.2. Paso 2. Cálculo de la inclinación óptima de los módulos

Conocida la radiación incidente media mensual en superficie horizontal y siguiendo las ecuaciones del apartado 4.2 se puede calcular la radiación solar incidente para diferentes ángulos. En particular se han determinado dichas radiaciones para los ángulos de inclinación de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 grados. En la siguiente tabla se recogen dichos resultados:

| Mes | G_a Global (KWh/m ² / día) | | | | | | |
|------|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | 1,385 | 1,514 | 1,584 | 1,625 | 1,636 | 1,617 | 1,569 |
| Feb | 2,036 | 2,139 | 2,176 | 2,176 | 2,139 | 2,066 | 1,960 |
| Mar | 3,062 | 3,104 | 3,078 | 3,004 | 2,882 | 2,718 | 2,516 |
| Abr | 4,040 | 4,041 | 3,970 | 3,837 | 3,647 | 3,405 | 3,119 |
| May | 4,121 | 4,109 | 4,024 | 3,872 | 3,658 | 3,387 | 3,069 |
| Jun | 4,743 | 4,702 | 4,587 | 4,399 | 4,143 | 3,828 | 3,464 |
| Jul | 4,558 | 4,526 | 4,421 | 4,244 | 4,002 | 3,701 | 3,352 |
| Ago | 4,071 | 4,075 | 4,005 | 3,870 | 3,674 | 3,423 | 3,126 |
| Sep | 3,571 | 3,584 | 3,530 | 3,421 | 3,260 | 3,053 | 2,806 |
| Oct | 2,374 | 2,467 | 2,492 | 2,474 | 2,415 | 2,316 | 2,180 |
| Nov | 1,624 | 1,744 | 1,803 | 1,829 | 1,823 | 1,785 | 1,716 |
| Dic | 1,205 | 1,342 | 1,422 | 1,476 | 1,501 | 1,499 | 1,467 |
| TOT. | 36,790 | 37,347 | 37,090 | 36,226 | 34,781 | 38,20 | 30,343 |

Según el criterio del Mes Crítico que es el que se está empleando requiere, una vez conocido el consumo, se ha de preparar a partir de la tabla de radiaciones, la tabla de cocientes Consumo / Radiación que es la que se muestra a continuación:

| Mes | E_T / G_d | | | | | | |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | 2.41 | 2.20 | 2.11 | 2.05 | 2.04 | 2.06 | 2.12 |
| Feb | 1,64 | 1,56 | 1,53 | 1,53 | 1,56 | 1,61 | 1,70 |
| Mar | 1,09 | 1,07 | 1,08 | 1,11 | 1,16 | 1,23 | 1,32 |
| Abr | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,87 | 0,91 | 0,98 | 1,07 |
| May | 0,81 | 0,81 | 0,83 | 0,86 | 0,91 | 0,98 | 1,09 |
| Jun | 0,70 | 0,71 | 0,73 | 0,76 | 0,80 | 0,87 | 0,96 |
| Jul | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,79 | 0,83 | 0,90 | 0,99 |
| Ago | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,86 | 0,91 | 0,97 | 1,07 |
| Sep | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,97 | 1,02 | 1,09 | 1,19 |
| Oct | 1,40 | 1,35 | 1,34 | 1,35 | 1,38 | 1,44 | 1,53 |
| Nov | 2,05 | 1,91 | 1,85 | 1,82 | 1,83 | 1,87 | 1,94 |
| Dic | 2,77 | 2,48 | 2,34 | 2,26 | 2,21 | 2,22 | 2,27 |
| TOT. | 1.09 | 1.07 | 1.08 | 1.10 | 1.15 | 1.22 | 1.32 |

Para cada inclinación se busca el mayor valor de todos los cocientes de la columna. Se han señalado en negrita. Como se puede comprobar, puesto que en este caso el consumo es constante, esos valores coinciden con el mes de diciembre. Una vez que se conocen esos valores se elige a continuación el menor de todos ellos que en este caso corresponde al valor de 2.21 y 40 ° de inclinación (señalado en sombreado).

Resultado: **Inclinación de los módulos 40 °. $G_{m\beta} = 1,5 \text{ kWh /m}^2/\text{día}$**

5.3. Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico

Para calcular el número de módulos que se han de instalar, supongamos que se emplea el módulo I-110 con potencia de 110 W. Aplicando la expresión:

$N_T = E_T / (P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G)$ con un factor de pérdidas de 0.75:

$N_T = 3334 / (110 \cdot 1,501 \cdot 0,75) = 26,9$ módulos. En principio se emplearían 27 módulos. (Este número puede cambiar).

Respecto al número de ellos en serie y en paralelo sería:

$N_s = V_{Bat} / V_m = 24 / 17,4 = 1,4 \approx 2$ módulos serie

$N_p = N_T / N_s = 27 / 2 = 13,5 \approx 14$ módulos en paralelo

Estructura 14 x 2 módulos (paralelo x serie)

5.4. Paso 4. Dimensionado de la batería

Recordamos que los dos parámetros importantes para el dimensionado de la batería son la máxima profundidad de descarga y el número de días de autonomía. En este caso estos valores son:

$P_d = 0,6$ y $N = 6$.

Por lo tanto la capacidad nominal de la batería será:

$$C_n(\text{Wh}) = E_T \cdot N / P_d = 3334 \cdot 6 / 0.6 = \mathbf{33340 \text{ Wh}}$$
$$C_n(\text{Ah}) = C_n(\text{Wh}) / V_{\text{bat}} = 33340 / 24 = \mathbf{1389 \text{ Ah}}$$

5.5. Paso 5. Dimensionado del regulador

La intensidad de corriente que produce el generador es la suma de las intensidades que producen los módulos funcionando a pleno rendimiento:

$$I_G = I_R \cdot N_R \quad I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m$$

$$I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m = 110 \cdot 0.75 / 6.1 = 13.5 \text{ A}$$

$$I_G = I_R \cdot N_R = 13.5 \cdot 14 = 189 \text{ A}$$

La intensidad que consume la carga se determina teniendo en cuenta todos los consumos al mismo tiempo:

$$I_C = P_{\text{DC}} / V_{\text{bat}} + P_{\text{AC}} / 220 = 1103 / 24 + 795 / 220 = 49.5 \text{ A}$$

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

$$I_R = \max(I_G, I_C) = \mathbf{182 \text{ A.}}$$

5.6. Paso 6. Dimensionado del inversor

La Potencia AC de todos los elementos que funcionan en alterna es de 795 W. Todos estos elementos no estarán funcionando a la vez, por lo que multiplicando por un factor de funcionamiento del 75 % proporcionaría una potencia alterna de 596 W. Se deberá instalar por tanto un inversor que tenga una potencia entorno a los 600W.

6. Ejemplo 2. Consumo sólo parte del año

- * Perfil de consumo constante pero sólo los meses de abril, mayo, junio y julio
- * Ubicación: Oviedo.
- * Equipos en continua (DC):

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. |
|-------------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Iluminación habitaciones | 20 | 4 | 2 |
| Iluminación salón | 40 | 2 | 4 |
| Iluminación Cocina | 40 | 1 | 3 |
| Iluminación Cuartos de baño | 30 | 2 | 2 |
| Iluminación Exterior Vivienda | 40 | 2 | 2 |
| Teléfono | 20 | 1 | 5 |
| Motor de extracción de agua | 743 | 1 | 0,7 |

- * Equipos en alterna (AC):

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. |
|------------------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Lavadora | 380 | 1 | 0,5 |
| Vídeo | 30 | 1 | 5 |
| Televisor color | 100 | 1 | 2 |
| Radiocasete | 5 | 1 | 2 |
| Frigorífico | 90 | 1 | 3 |
| Congelador | 110 | 1 | 4 |
| Ordenador | 80 | 1 | 3 |

- * Eficiencia de la Batería:..... 95 %
- * Eficiencia del inversor: 90 %
- * Máxima profundidad de descarga: 60 %
- * N° de días de autonomía: 6
- * Tensión Nominal de la Batería..... 24 V

Latitud de Oviedo: $\phi = 43,35^\circ$

Radiación global media mensual sobre superficie horizontal para cada mes del año:

| Oviedo | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | Media |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Gd Wh/m ² | 1.385 | 2.038 | 3.062 | 4.040 | 4.121 | 4.743 | 4.558 | 4.071 | 3.571 | 2.374 | 1.624 | 1.205 | 3.066 |

Características de los módulos a emplear:

I-110. Potencia 110 W. $I_{sc} = 6.54$ A. $V_{oc} = 21.6$ V. $I_{max} = 6.1$ A. $V_{max} = 17.4$ V.

6.1. Paso 1. Estimación de consumos

Los consumos en continua son los siguientes:

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. | Consumo (Wh/día) |
|-------------------------------|--------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Iluminación habitaciones | 20 | 4 | 2 | 160 |
| Iluminación salón | 40 | 2 | 4 | 320 |
| Iluminación Cocina | 40 | 1 | 3 | 120 |
| Iluminación Cuartos de baño | 30 | 2 | 2 | 120 |
| Iluminación Exterior Vivienda | 40 | 2 | 2 | 160 |
| Teléfono | 20 | 1 | 5 | 100 |
| Motor de extracción de agua | 743 | 1 | 0,7 | 520,1 |
| CONSUMO TOTAL DC | | | | 1.500 |

Los consumos en alterna son los siguientes:

| Descripción del equipo | Potencia (W) | Número de equipos | Horas/día Función.. | Consumo (Wh/día) |
|-------------------------|--------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Lavadora | 380 | 1 | 0,5 | 190 |
| Vídeo | 30 | 1 | 5 | 150 |
| Televisor color | 100 | 1 | 2 | 200 |
| Radiocasete | 5 | 1 | 2 | 10 |
| Frigorífico | 90 | 1 | 3 | 270 |
| Congelador | 110 | 1 | 4 | 440 |
| Ordenador | 80 | 1 | 3 | 240 |
| CONSUMO TOTAL AC | | | | 1.500 |

Es decir:

$$E_{DC} = 1500 \text{ W h/día}$$

$$E_{AC} = 1500 \text{ Wh /día}$$

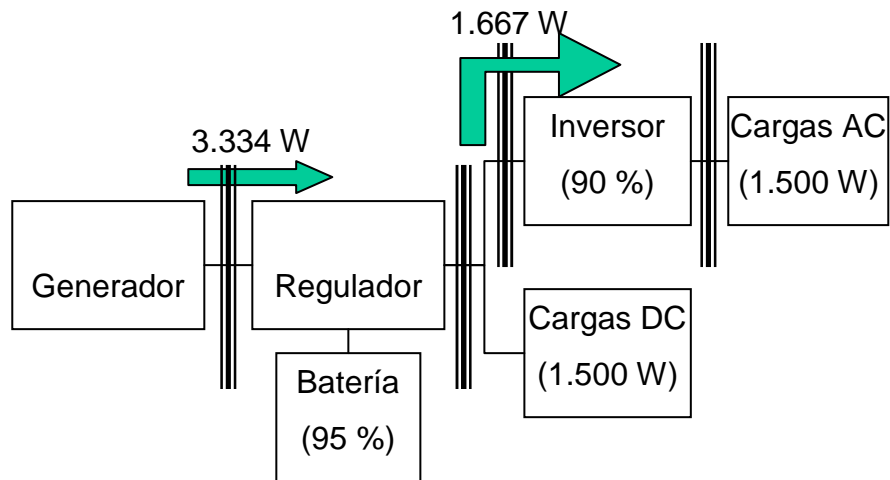
Recordamos que las eficiencias de la batería y del inversor influyen en el cálculo de la energía total necesaria. Si se tiene en cuenta el esquema básico de un SFVA con cargas DC y AC como el que se muestra a continuación, se puede comprobar como la eficiencia del inversor solamente afecta al consumo AC.

La energía consumida al día es:

$$E_T = E_{DC} / \eta_{BAT} + E_{AC} / (\eta_{BAT} \cdot \eta_{INV})$$

$$E_T = 1500 / 0.95 + 1500 / (0.95 \cdot 0.90) = \mathbf{3334 \text{ Wh /día}}$$

Esto se puede resumir en el siguiente esquema:



Se puede comprobar como en vez de necesitar 3.000 Wh/día se precisan 3.334 Wh/día.

6.2. Paso 2. Cálculo de la inclinación óptima de los módulos

Conocida la radiación incidente media mensual en superficie horizontal y siguiendo las ecuaciones del apartado 4.2 se puede calcular la radiación solar incidente para diferentes ángulos. En particular se han determinado dichas radiaciones para los ángulos de inclinación de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 grados. En la siguiente tabla se recogen dichos resultados:

| Mes | G_d Global (KWh/m ² / día) | | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | | | | | | | |
| Feb | | | | | | | |
| Mar | | | | | | | |
| Abr | 4,040 | 4,041 | 3,970 | 3,837 | 3,647 | 3,405 | 3,119 |
| May | 4,121 | 4,109 | 4,024 | 3,872 | 3,658 | 3,387 | 3,069 |
| Jun | 4,743 | 4,702 | 4,587 | 4,399 | 4,143 | 3,828 | 3,464 |
| Jul | 4,558 | 4,526 | 4,421 | 4,244 | 4,002 | 3,701 | 3,352 |
| Ago | | | | | | | |
| Sep | | | | | | | |
| Oct | | | | | | | |
| Nov | | | | | | | |
| Dic | | | | | | | |

En este caso se han eliminado las radiaciones de los meses que no interesa.

De nuevo, empleando el criterio del Mes Crítico que es el que se está empleando requiere, una vez conocido el consumo, se ha de preparar a partir de la tabla de radiaciones, la tabla de cocientes Consumo / Radiación que es la que se muestra a continuación:

| Mes | E_T / G_d | | | | | | |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
| Ene | | | | | | | |
| Feb | | | | | | | |
| Mar | | | | | | | |
| Abr | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,87 | 0,91 | 0,98 | 1,07 |
| May | 0,81 | 0,81 | 0,83 | 0,86 | 0,91 | 0,98 | 1,09 |
| Jun | 0,70 | 0,71 | 0,73 | 0,76 | 0,80 | 0,87 | 0,96 |
| Jul | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,79 | 0,83 | 0,90 | 0,99 |
| Ago | | | | | | | |
| Sep | | | | | | | |
| Oct | | | | | | | |
| Nov | | | | | | | |
| Dic | | | | | | | |

Para cada inclinación se busca el mayor valor de todos los cocientes de la columna. Se han señalado en negrita. Como se puede comprobar, esos valores coinciden con el mes de abril, salvo el último que sería para el mes de mayo. Una vez que se conocen esos valores se elige a continuación el menor de todos ellos que en este caso corresponde al valor de 0.83 y 0 ° de inclinación (señalado en sombreado).

Resultado: **Inclinación de los módulos 0 °. $G_{m\beta} = 4,04 \text{ kWh /m}^2/\text{día}$**

6.3. Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico

Para calcular el número de módulos que se han de instalar, supongamos que se emplea el módulo I-110 con potencia de 110 W. Aplicando la expresión:

$N_T = E_T / (P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G)$ con un factor de pérdidas de 0.75:

$N_T = 3334 / (110 \cdot 4,04 \cdot 0,75) = 10,00$ módulos. En principio se emplearían 10 módulos. (Este número puede cambiar).

Respecto al número de ellos en serie y en paralelo sería:

$N_s = V_{Bat} / V_m = 24 / 17,4 = 1,4 \approx 2$ módulos serie

$N_p = N_T / N_s = 10 / 2 = 5 \approx 5$ módulos en paralelo

Estructura 5 x 2 módulos (paralelo x serie)

6.4. Paso 4. Dimensionado de la batería

Recordamos que los dos parámetros importantes para el dimensionado de la batería son la máxima profundidad de descarga y el número de días de autonomía. En este caso estos valores son:

$P_d = 0,6$ y $N = 6$.

Por lo tanto la capacidad nominal de la batería será:

$C_n(\text{Wh}) = E_T \cdot N / P_d = 3334 \cdot 6 / 0,6 = \mathbf{33340 \text{ Wh}}$

$$C_n (\text{Ah}) = C_n (\text{Wh}) / V_{\text{bat}} = 33340 / 24 = \mathbf{1389 \text{ Ah}}$$

6.5. Paso 5. Dimensionado del regulador

La intensidad de corriente que produce el generador es la suma de las intensidades que producen los módulos funcionando a pleno rendimiento:

$$I_G = I_R \cdot N_R \quad I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m$$

$$I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m = 110 \cdot 0.75 / 6.1 = 13.5 \text{ A}$$

$$I_G = I_R \cdot N_R = 13.5 \cdot 14 = 189 \text{ A}$$

La intensidad que consume la carga se determina teniendo en cuenta todos los consumos al mismo tiempo:

$$I_C = P_{\text{DC}} / V_{\text{bat}} + P_{\text{AC}} / 220 = 1103 / 24 + 795 / 220 = 49.5 \text{ A}$$

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

$$I_R = \max (I_G, I_C) = \mathbf{182 \text{ A.}}$$

6.6. Paso 6. Dimensionado del inversor

La Potencia AC de todos los elementos que funcionan en alterna es de 795 W. Todos estos elementos no estarán funcionando a la vez, por lo que multiplicando por un factor de funcionamiento del 75 % proporcionaría una potencia alterna de 596 W. Se deberá instalar por tanto un inversor que tenga una potencia entorno a los 600W.

7. Resumen

Se ha presentado un método de dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos, sencillo, de fácil comprensión y que no requiere un ordenador para realizar los cálculos. Los resultados que se consiguen son muy parecidos a los que se obtendría por métodos más complicados por lo que se deduce que es un método válido para una primera aproximación en el cálculo del dimensionado de un SFA.

8. Bibliografía

Richard N. Chapman. *Sizing Handbook for stand alone photovoltaic / storage systems*. Sandia National Laboratories. April 1987

M. A. Egido, E. Lorenzo. *The sizing of stand alone pv systems: a review and proposed method*. Solar Energy Materials and Solar Cells 26 (1992) 51-69.

E. Lorenzo et al. *Electricidad Solar*. Progensa. 1994.

M. Sidrach-de-Cardona, Ll. Mora López. *A simple model for sizing stand alone photovoltaic systems*. Solar Energy Materials and Solar Cells 55 (1998) 199-214.

M. Sidrach-de-Cardona, Ll. Mora López. *A general multivariate qualitative model for sizing stand alone photovoltaic systems*. Solar Energy Materials and Solar Cells 59 (1999) 185-197.

L. Barra, S. Cataloni, F. Fontana, F. Lavorante. Solar Energy 33. 6. 1984. 509-514.

B. Bartoli, V. Cuomo, F. Fontana, C. Serio, V. Silvestrini. Applied Energy 18. 1984. 37-47.

Luque y Hedegeus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley And Sons Ltd. 2003