

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

- 4.1 Aspectos Generales de la Célula Fotovoltaica.
- 4.2 La Función Utilizabilidad.
- 4.3 Metodología de Cálculo mediante la Función Utilizabilidad.
- 4.4 Descripción de las Instalaciones.

4.1 EL GENERADOR FOTOVOLTAICO.

El elemento más importante en una instalación fotovoltaica es el módulo fotovoltaico, es por ello por lo que se le dedica este capítulo al análisis y caracterización de este tipo de paneles.

El generador fotovoltaico se compone de módulos o paneles fotovoltaicos, a su vez, compuestos por un número determinado de células fotovoltaicas. En éstas se produce la transformación fotoeléctrica

energía solar \Rightarrow energía eléctrica continua

Para caracterizar cuantitativamente esta transformación se introducirán varios parámetros:

- Corriente de cortocircuito (i_{CC}). Es la corriente que se obtiene de la célula cuando la tensión entre sus bornes es nula. Constituye el valor máximo que puede generarse en la célula solar.
- Tensión de circuito abierto (v_{ca}). Es la tensión para la que la corriente extraída de la célula se anula. Constituye la máxima tensión que puede obtenerse en bornes de la célula.
- Potencia máxima (P_{MAX}). Dado que la célula solar no cede potencia en las situaciones extremas – cortocircuito y circuito abierto – existe un valor óptimo de máxima potencia.

- Factor de forma (FF). Definido en los siguientes términos:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{i_{CC} \cdot v_{ca}} \quad [4.1.1]$$

Lógicamente, el factor de forma tendrá como valor máximo la unidad.

- Eficiencia (η_c). Representa la relación entre la potencia cedida por la célula y la potencia solar incidente sobre ella (irradiancia).

$$\eta_c = \frac{i \cdot v}{A_c \cdot I} \cdot 100 \quad [4.1.2]$$

Ac e I son el área de la célula y la irradiancia global sobre la célula, respectivamente.

Los valores de intensidad y tensión en bornes de la célula dependerán de la potencia incidente y de la carga a la que esté conectada. La curva característica de la célula (posibles valores de tensión e intensidad) adopta una tipología tal y como la de la figura.

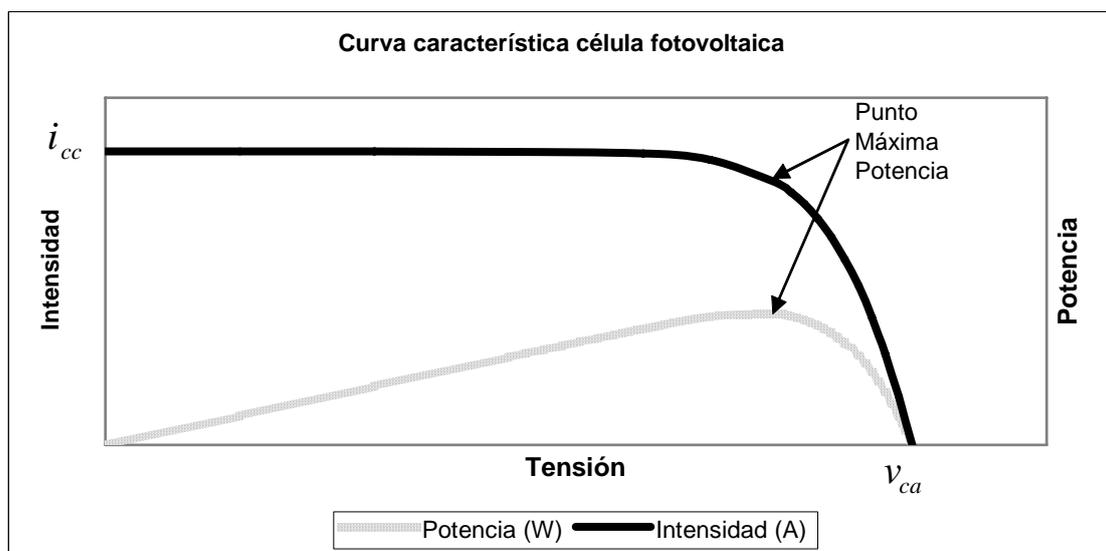


Figura 4.1.1. Curva característica de la célula fotovoltaica. Ubicación del punto de máxima potencia.

Cabe destacar que son factibles valores negativos de tensión e intensidad. Sin embargo, para la aplicación deseada sólo interesan aquellos para los que la célula actúa como un generador (i , v positivos).

4.1.1 MODELADO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA SOLAR.

El comportamiento de una célula fotovoltaica puede modelarse mediante el siguiente circuito electrónico.

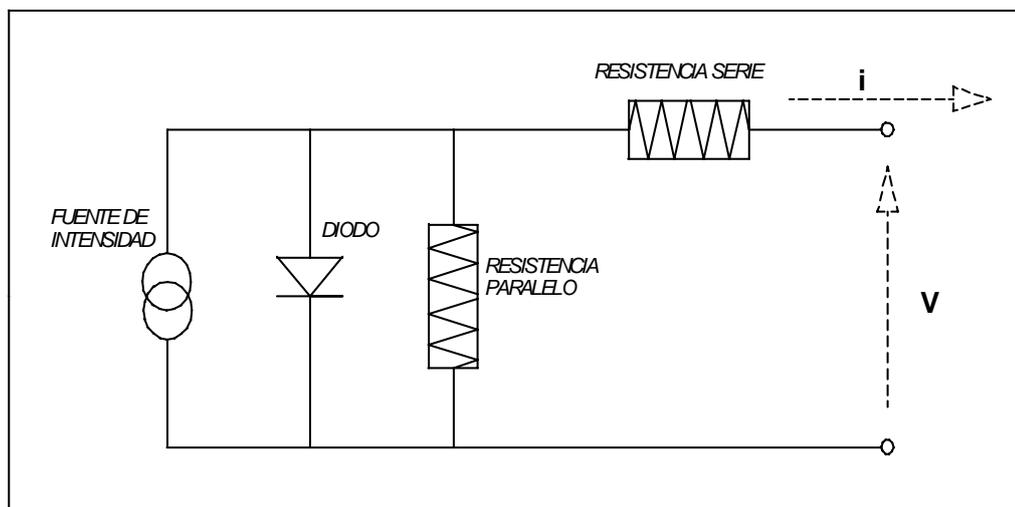


Figura 4.1.2. Circuito electrónico. Modelo de la célula fotovoltaica.

El circuito anterior se compone de un diodo de unión p-n ideal con un factor de idealidad m (factor comprendido entre 1 y 2, dependiente de cada célula) y de un generador de intensidad. Los dos elementos corresponden al modelo ideal. Para considerar un modelo real se introduce las resistencias serie (R_s) y paralelo (R_p). La influencia de ambas resistencias se producirá principalmente en el factor de forma y , a través de éste, en la eficiencia de la célula.

La resistencia serie de la célula es una resistencia interna asociada a diferentes efectos como la resistencia de los contactos, de los propios semiconductores y de los dedos metálicos que constituyen la malla de metalización frontal. Conforme aumenta la superficie de dicha malla, menor es la resistencia serie pero mayor el sombreado de la superficie efectiva célula.

La resistencia paralelo tiene su origen en imperfecciones en la calidad de la unión p-n que constituye la célula y es responsable de la existencia de fugas de corriente. La ecuación característica del circuito de la figura 4.1.2 se expone a continuación.

$$i = i_L - i_o \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] - \frac{v + i \cdot R_s}{R_p} \quad [4.1.3]$$

donde:

i_L es la corriente fotogenerada.

i_o es la corriente de saturación del diodo.

R_s y R_p son la resistencia serie y paralelo, respectivamente.

m es el factor de idealidad del diodo.

V_t es el voltaje térmico ($\frac{K \cdot T}{e}$ siendo K la constante de Boltzman y “ e ” la carga del electrón).

En células fotovoltaicas con una calidad aceptable (factor de forma y eficiencia elevada), la resistencia paralelo es muy grande en relación al numerador del último término de la ecuación 4.1.3.

La ecuación 4.1.3 puede ser simplificada mediante la aplicación del modelo de Green, basado en una serie de suposiciones y relaciones empíricas que permiten

determinar la curva característica del panel a partir de los datos suministrados por el fabricante (i_{CC} , v_{ca} y el factor de forma). En concreto, si en la ecuación 4.1.3 se considera que

- $\exp\left(\frac{v + i \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right) \gg 1$
- En cortocircuito se obtiene el mayor valor de la corriente de generación y como $i_L \gg i_o$ se puede aproximar $i_L = i_{CC}$.
- En la condición de circuito abierto ($i = 0$ y $v = v_{ca}$). Junto con la suposición del punto anterior se llega a :

$$i_o = i_{CC} \cdot \exp\left(-\frac{v_{ca}}{m \cdot V_t}\right) \quad [4.1.4]$$

Finalmente se consigue que:

$$i = i_{CC} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{v - v_{ca} + i \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right)\right] \quad [4.1.5]$$

El factor de idealidad adopta valores del orden unidad para dispositivos de silicio (1,3 para el silicio monocristalino). En cambio, la resistencia serie de la célula no suele ser suministrada por el fabricante. Green establece una relación empírica entre la tensión a circuito abierto y el factor de forma que permite estimar posteriormente la resistencia serie:

$$FF_o = \frac{\frac{v_{ca}}{V_t} - \ln\left(\frac{v_{ca}}{V_t} + 0,72\right)}{\frac{v_{ca}}{V_t} + 1} \quad [4.1.6]$$

FF_o representa el valor máximo del factor de forma, coincidente con la condición de $R_s = 0$.

En este caso, el modelo advierte que la resistencia serie puede ser calculada en la forma:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \left(\frac{v_{ca}}{i_{cc}}\right) \quad [4.1.7]$$

La representación gráfica de la ecuación 4.1.5 permite obtener la curva característica de la célula a partir de la información suministrada por el fabricante.

En el gráfico siguiente se puede observar la influencia de la resistencia serie sobre la curva característica de la célula.

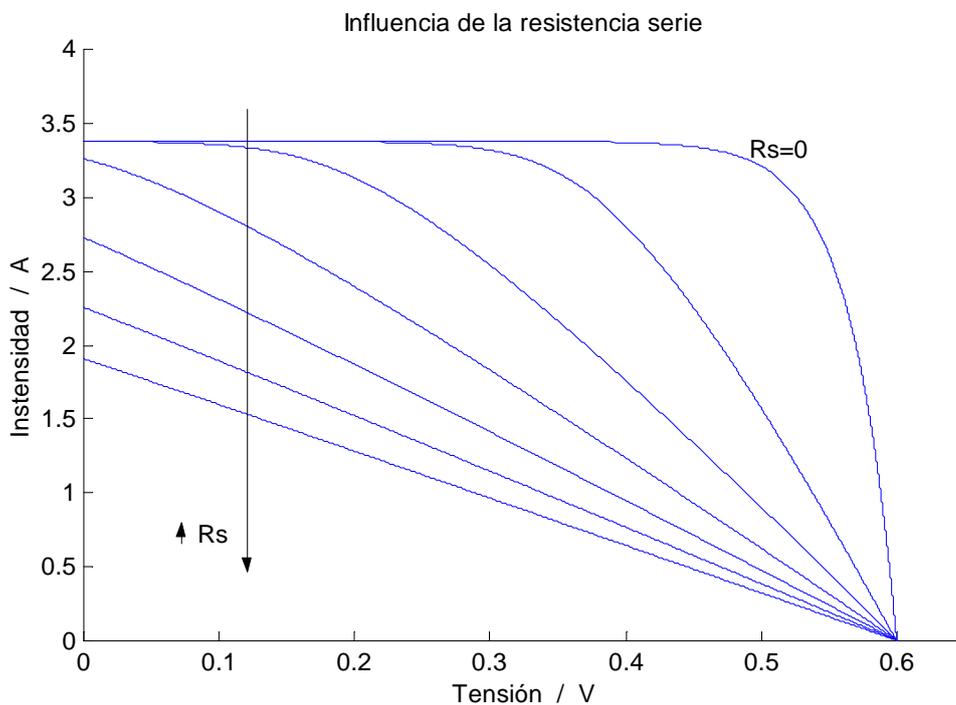


Figura 4.1.3. Influencia del aumento de la resistencia serie en la curva característica de la célula fotovoltaica. Gráfico correspondiente a $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y temperatura del panel de 25°C .

4.1.2 MODELADO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO.

En la práctica, la mayoría de las aplicaciones exigen niveles de tensión superiores a las que es capaz de generar una sola célula. Por esta razón se efectúan conexiones serie y paralelo hasta conseguir valores de intensidad y tensión acordes con cada aplicación. En el mercado se encuentran dichas asociaciones encapsuladas en un único bloque – panel o módulo fotovoltaico-.

El módulo fotovoltaico proporciona los niveles de voltaje e intensidad adecuados a cada aplicación, ofreciendo protección a las células frente a las agresiones de los agentes externos, aislamiento eléctrico y rigidez mecánica.

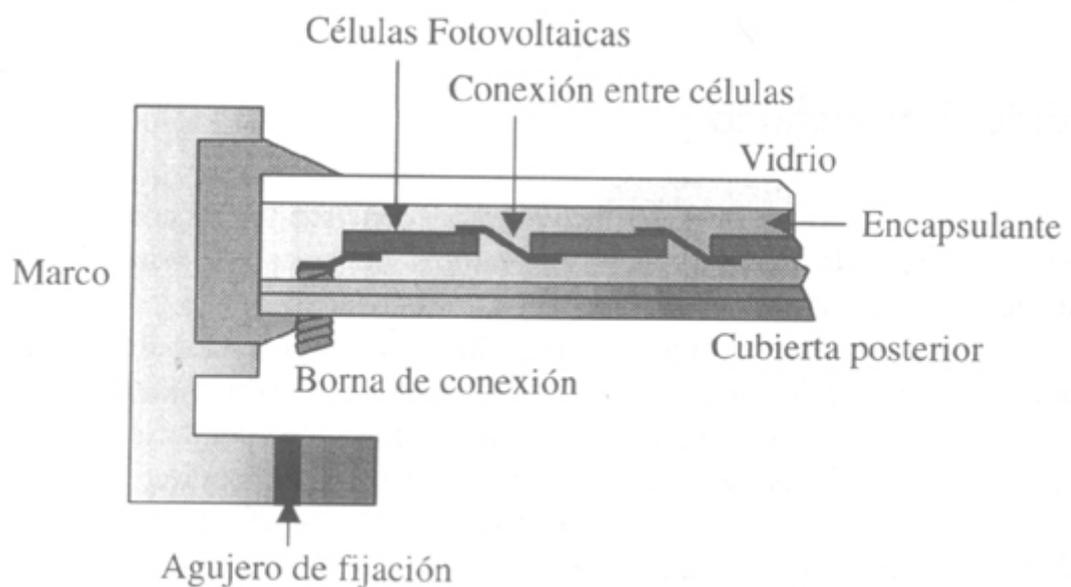


Figura 4.1.4. Sección transversal de un módulo fotovoltaico típico.

La estructura convencional de un módulo fotovoltaico se compone de:

- Cubierta frontal. Generalmente fabricada con vidrio con bajo contenido en hierro para minimizar la absorción de luz. Sería conveniente que su emisividad para longitudes de onda largas ($\lambda > 3\mu m$) adoptara valores elevados para aumentar las pérdidas radiantes y provocar en consecuencia una disminución de la temperatura de las células (en apartados posteriores se comprobará como el aumento de temperatura de las células penaliza su eficiencia).
- Encapsulante. Polímero transparente, aislante y termoplástico, que debe ser impermeable al agua y resistente a la fatiga térmica y la abrasión. Generalmente se emplea el EVA (etilen-vinil-acetato).
- Células solares y sus conectadores. Es el lugar en el que se produce la transformación fotovoltaica. Las cintas de interconexión eléctrica suelen ser de aluminio o acero inoxidable y se sueldan de forma redundante, con dos conductores paralelos para aumentar la recolección de portadores en ambas caras de la célula. Al aumentar la superficie de dichos conectadores se produce una disminución de las pérdidas por efecto Joule al existir una menor resistencia. En contrapartida, dicho aumento tiene el inconveniente del incremento del sombreado que dichos conductores proyectan sobre las células.
- Cubierta posterior. Normalmente es una película de Tedlar adosada en toda la superficie del módulo, aunque también existen modelos que emplean una nueva capa de Tedlar y un segundo vidrio.

Los bordes del bloque así laminado se protegen de la posible exfoliación con una junta de neopreno, y todo el conjunto va incrustado en un marco de aluminio adherido normalmente con silicona, que le proporciona resistencia mecánica y está preparado para permitir su instalación y ensamblaje en cualquier estructura. Se incorporan también una caja de conexiones externa

que cuenta con dos bornes de salida, positiva y negativa, para permitir el conexionado de módulos.

La curva característica $i-v$ de un panel fotovoltaico se fundamenta en la correspondiente a la célula. En efecto, el modelo circuital del panel se compone de la asociación serie-paralelo de un número determinado de circuitos similares al de la figura 4.1.2, según el número de células dispuestas en serie y paralelo que tenga el panel. La ecuación característica del panel es:

$$i = i_{cc} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{v - v_{ca} + i \cdot R_s \cdot \frac{NCS}{NCP}}{m \cdot K \cdot T \cdot \frac{NCS}{e}} \right) \right] \quad [4.1.8]$$

Cuando el módulo no es capaz de satisfacer las necesidades de tensión e intensidad se efectúa una interconexión serie/paralelo de varios módulos.

Las expresiones anteriores se basan en la hipótesis de que todas las células y módulos del generador fotovoltaico son iguales y trabajan en idénticas condiciones de operación. En la práctica, las células y módulos poseen cierta dispersión en sus características motivada por varios efectos:

- Dispersión natural en el proceso de fabricación.
- Diferentes condiciones de operación que, simultáneamente, pueden ocurrir dentro del generador (sombreados parciales).

El efecto de esta dispersión es dual:

- La potencia máxima que cede el generador se inferior a la suma de las potencias de los módulos (pérdidas por dispersión)
- Algunas células pueden llegar a convertirse en “cargas” y disipar la energía generada por las demás, aumentando su temperatura.

Estas pérdidas pueden alcanzar valores del 10 % en ínter conexiones con un número de módulos elevado (superior a 70).

Otras pérdidas producidas en el generador fotovoltaico son las que se dan en el cableado (efecto Joule). Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la intensidad luego sería deseable trabajar con intensidades lo más reducidas posible. No obstante, para una determinada potencia cedida, el nivel de tensión aumentará, lo que eventualmente conllevará problemas de seguridad eléctrica.

Los dos tipos de pérdidas anteriores (dispersión y cableado) son generalmente despreciables frente a las dos pérdidas más importantes en un generador fotovoltaico: pérdidas térmicas (~75%) y pérdidas por reflexión en la cubierta de los módulos (~8%). En capítulos posteriores se analizarán detalladamente estas pérdidas.

Para las condiciones estándar de funcionamiento, se tiene que el error cometido al calcular el rendimiento mediante el modelo de Green, respecto al valor experimental suministrado por la tabla 4.1.1, es del 0.5%.

4.1.3 CONDICIONES ESTÁNDARES (CEM) Y CONDICIONES NOMINALES DE OPERACIÓN (CNO).

El comportamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico, es decir, su característica i-v, bajo unas determinadas condiciones de iluminación y temperatura, puede obtenerse a partir de la información característica que, conjuntamente con el módulo, suministra el fabricante. Los parámetros característicos del módulo fotovoltaico ofrecidos por el fabricante suelen corresponder a las condiciones estándar de medida:

- Irradiancia (I_0). 1000 W/m².
- Incidencia normal.
- Temperatura de la célula (T_0): 298,15 K
- Distribución espectral: AM 1.5

No obstante, las condiciones de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos generalmente se alejan de las anteriores. Por ejemplo, bajo niveles de irradiancia de 1000 W/m², los módulos adquirirán temperaturas superiores a 25 °C, salvo en días de invierno muy fríos y claros. Para evitar esta circunstancia se utilizan las Condiciones Nominales de Operación:

- Irradiancia (I_{CNO}): 800 W/m².
- Velocidad del viento: 1 m/s.
- Temperatura ambiente: 20 °C.
- Temperatura (TONC): Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC). Valor suministrado por el fabricante (experimental).

4.1.4 MODIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO BÁSICO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO.

Los módulos fotovoltaicos se expondrán a las variaciones propias de la climatología del lugar donde se ubiquen. Este hecho obliga a realizar un análisis del comportamiento de los módulos para determinar la alteración de su curva característica ante distintos valores de las variables climatológicas.

La curva i-v de cualquier módulo fotovoltaico depende de forma acusada de la temperatura de la célula y de la irradiancia. No debe obviarse la dependencia de dicha temperatura de otras variables como la temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, temperatura equivalente de cielo, temperatura del terreno, etc. No obstante, la influencia sobre la eficiencia del módulo es indirecta y siempre a través de la temperatura del panel.

Influencia de la temperatura del módulo fotovoltaico.

La temperatura del panel va a incidir fundamentalmente en la disminución de la tensión a circuito abierto y, por tanto, de la eficiencia por mantenerse la intensidad de cortocircuito prácticamente constante (realmente existe un ligero aumento). En efecto, al disminuir dicha tensión se provocará una reducción de la tensión de máxima potencia del panel.

Para módulos con células de silicio, la disminución de la tensión a circuito abierto por célula se cifra en torno a 2,3 mV/°C; en el caso de la eficiencia, en 0,07 % / °C (0,07 puntos porcentuales por °C); la intensidad de cortocircuito sufre un aumento de 1,5 mA/°C.

El modelo que se va a adoptar en este proyecto considera, para un nivel de irradiancia invariable, que la influencia de la temperatura del panel sobre la tensión a circuito abierto es lineal. Cuando la irradiancia es variable se optará por:

$$v_{ca}(T_{CEL}, I) = v_{ca_0} - \beta \cdot (T_{CEL} - T_0) + \frac{m \cdot K \cdot T_{CEL}}{e} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad [4.1.9]$$

T_{CEL} representa la temperatura de la célula.

Influencia de la irradiancia incidente sobre el módulo fotovoltaico.

La irradiancia incide acusadamente sobre la intensidad generada por el módulo fotovoltaico. Un modelo simplificado muy utilizado considera la linealidad de la intensidad de cortocircuito y el nivel de irradiancia.

$$\frac{i_{cc}}{i_{cco}} = \frac{I}{I_0} \quad [4.1.10]$$

No obstante, la igualdad anterior sólo es aplicable para variaciones de irradiancia a temperatura del módulo constante y resulta una aproximación cuando ésta varía, ya que desprecia los efectos que la temperatura tiene sobre la intensidad de cortocircuito.

Un modelo más aproximado que no adolece del defecto anterior que considera una dependencia lineal con la temperatura del módulo y la irradiancia es el siguiente.

$$i_{cc}(T_{CEL}, I) = i_{cco} \cdot \frac{I}{I_0} + \alpha \cdot (T_{CEL} - T_0) \quad [4.1.11]$$

La ecuación 4.1.10 tiene no tiene un campo de aplicación absoluto ya que introduce errores importantes para irradiancias inferiores a 100 W/m². Para valores superiores, el segundo término es despreciable respecto al primero, incluso para temperaturas del módulo elevadas. En cambio, cuando la irradiancia rebasa la cota inferior anterior ambos términos se hacen del mismo orden, hecho que provoca valores ilógicos del rendimiento. En concreto, se observa un incremento desmesurado de la eficiencia conforme disminuye la irradiancia por debajo de los 100 W/m². Para solventar este problema, la ecuación 4.1.10 será aplicada a bajos niveles de irradiancia; la 4.1.11, a medios y altos niveles. El error cometido al usar la ecuación 4.1.10 será suficientemente reducido debido a que la temperatura del panel no se verá muy afectada por los reducidos niveles de irradiancia. Cabe destacar que es poco usual temperaturas del panel elevadas y niveles de irradiancia inferiores a 100 W/m² ya que estos valores obligarían a temperaturas ambientales muy elevadas, incompatibles en un principio con los reducidos niveles de irradiancia. En cualquier caso, el modelo permite su aplicación en cualquier situación.

Las expresiones anteriores modelan el efecto de la temperatura y la irradiancia sobre una célula fotovoltaica. En el caso de un módulo fotovoltaico con NCS- número de células serie por módulo- y NCP- número de células en paralelo por módulo- deben escalarse los parámetros alfa, beta y m.:

$$\alpha' = NCP \cdot \alpha \quad [4.1.12]$$

$$\beta' = NCS \cdot \beta \quad [4.1.13]$$

$$m' = NCS \cdot m \quad [4.1.13]$$

$$i'_{cc_0} = NCS \cdot i_{cc_0} \quad [4.1.14]$$

$$v'_{ca_0} = NCS \cdot v_{ca_0} \quad [4.1.15]$$

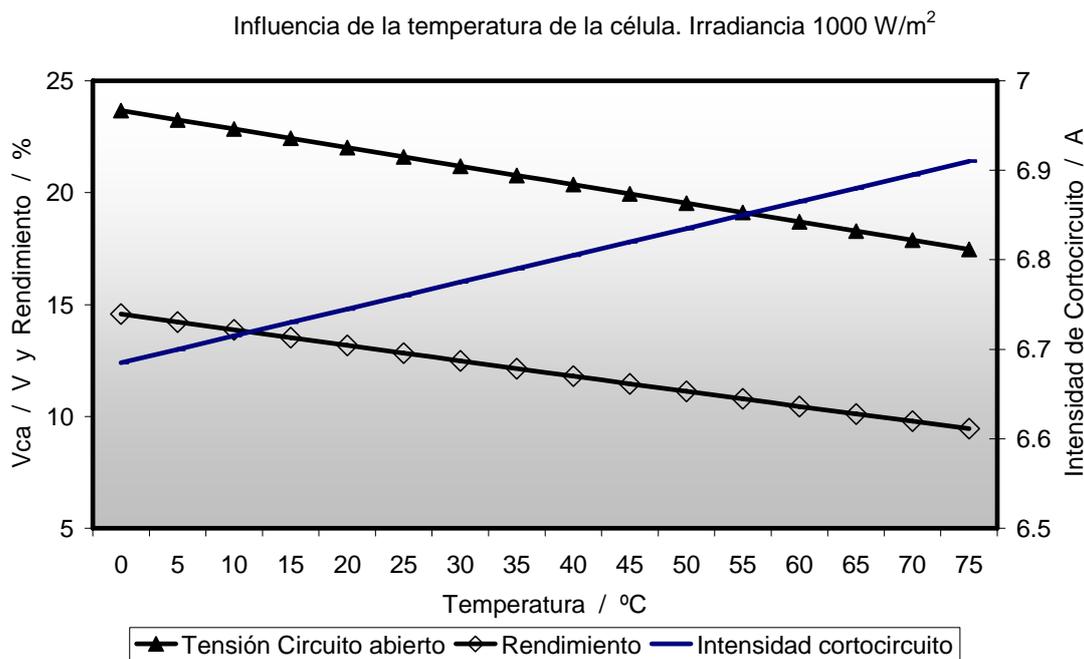


Figura 4.1.5. Influencia de la temperatura en el comportamiento de la célula fotovoltaica. Irradiancia de 1000 W/m^2

La temperatura tiene un efecto negativo sobre el rendimiento del módulo debido fundamentalmente a la reducción de la tensión a circuito abierto. En efecto, la intensidad de cortocircuito permanece ligeramente constante al variar la temperatura. La penalización máxima –máxima temperatura del panel- asociada al aumento de temperatura ronda el 30%. Aunque es posibles temperaturas superiores a los 75 °C , generalmente, el panel se mantiene por debajo de ese valor. En cualquier caso, la evolución lineal, suponiendo irradiancia constante, se mantiene para cualquier rango de temperaturas.

Se observa como el rendimiento puede superar al correspondiente CEM (Condiciones Estándar de Medida) para temperaturas del panel inferiores a 25 °C . Sin embargo, esta posibilidad sólo es factible ante niveles de irradiancia reducidos, instantes de poco interés para la instalación fotovoltaica. Sólo en climas muy fríos podría alcanzarse temperaturas pequeñas con irradiancias no despreciables.

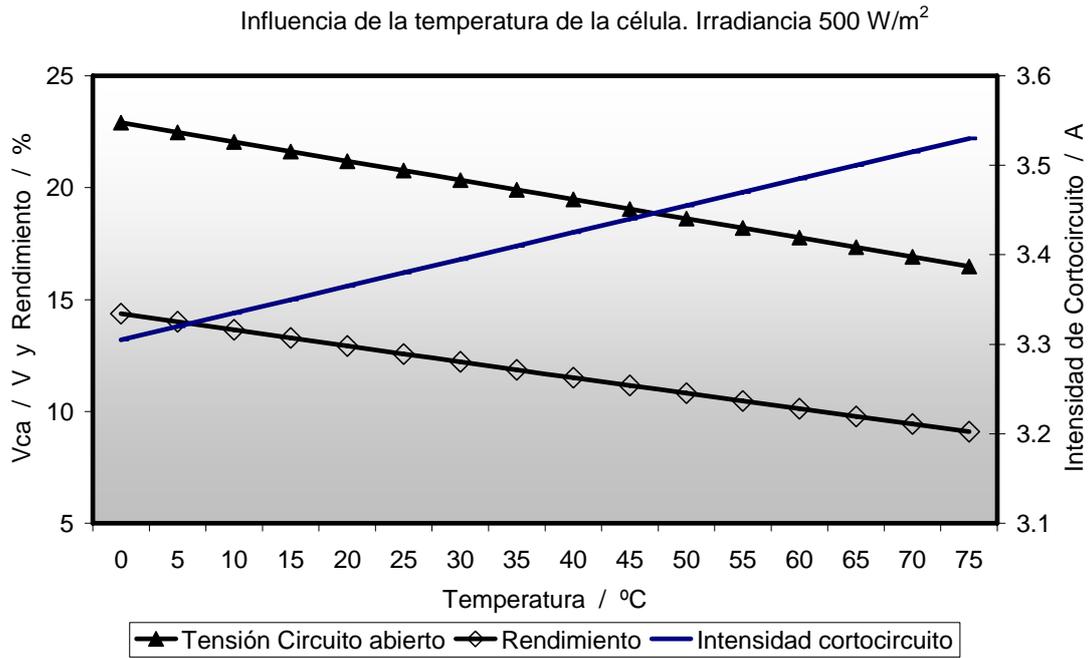


Figura 4.1.6. Influencia de la temperatura en el comportamiento de la célula fotovoltaica.. Irradiancia de 500 W/m²

Cuando el nivel de irradiancia se reduce a 500 W/m² las tendencias se repiten luego se extienden los comentarios anteriores. La intensidad de cortocircuito toma valores más reducidos como consecuencia de la proporcionalidad con la irradiancia.

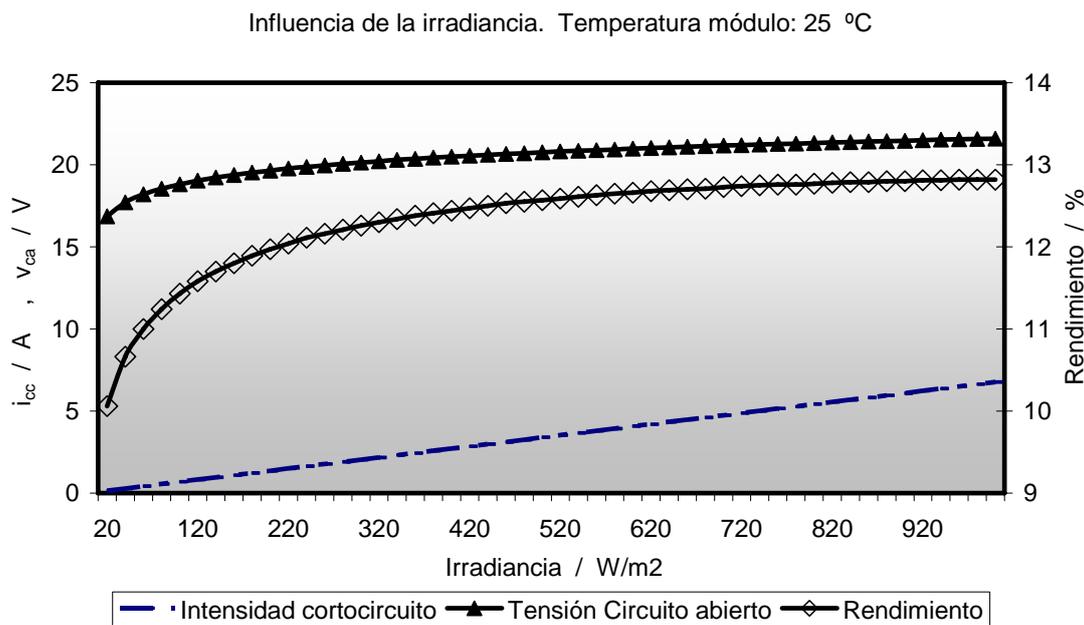


Figura 4.1.7. Influencia de la irradiancia en el comportamiento de la célula fotovoltaica. Temperatura del módulo 25°C

La variación de la irradiancia va a incidir de forma acusada en la intensidad de cortocircuito. El rendimiento sólo se reducirá en un máximo del 24% debido a que la tensión a circuito abierto es poco variable y la intensidad de cortocircuito es proporcional a la irradiancia –las ecuaciones 4.1.10 y 4.1.11 son coincidentes por ser la temperatura del panel la de referencia-. De hecho, el efecto de la irradiancia, a través de la intensidad de cortocircuito, sobre el rendimiento se anula luego la variación del rendimiento será causada prácticamente por la variación de la tensión a circuito abierto.

Cuando la temperatura aumenta hasta 60 °C, las ecuaciones 4.1.10 y 4.1.11 divergen, fundamentalmente a irradiancias reducidas.

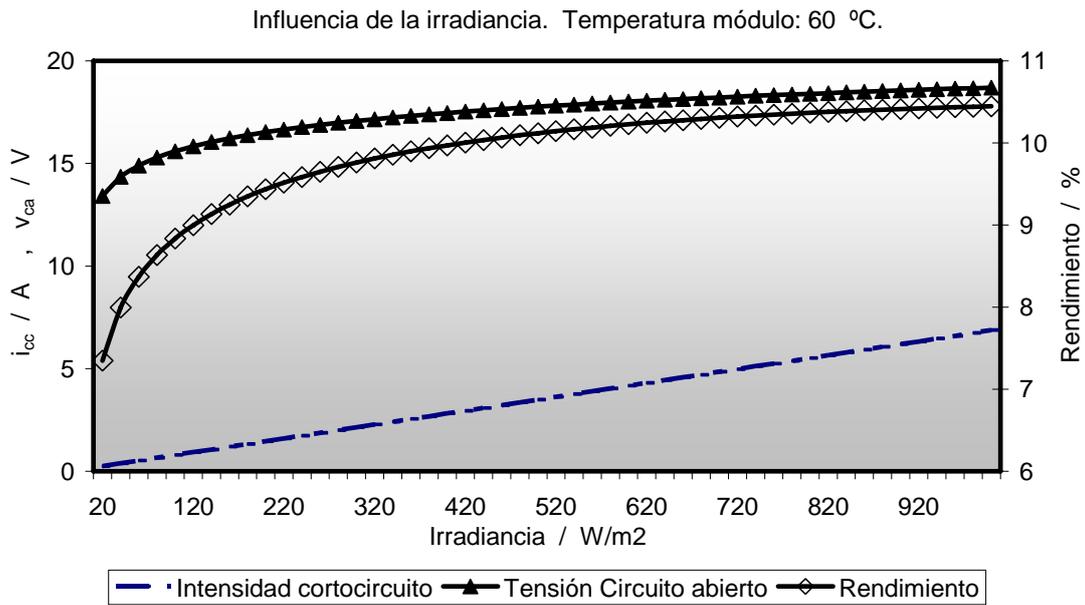


Figura 4.1.8. Influencia de la irradiancia en el comportamiento de la célula fotovoltaica. Temperatura de la célula de 60°C. Evolución del rendimiento basada en la ecuación 4.1.6, según la cual se desprecia la dependencia con la temperatura a bajos niveles de irradiancia, y en la ecuación 4.1.7 para irradiancias superiores 100 W/m².

Cuando la temperatura del panel aumenta hasta 60°C, la tensión a circuito abierto y la intensidad de cortocircuito evolucionan de forma semejante a la situación anterior.

Curvas características de un módulo fotovoltaico para distintas condiciones de irradiancia y temperatura del módulo.

Los paneles fotovoltaico escogidos para realizar la simulación informática corresponden al modelo I-110 de la empresa Isofotón S.A. Las especificaciones técnicas de dicho modelo se resumen en la tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1. Especificaciones del módulo fotovoltaico seleccionado (I-110 de Isofotón).

ESPECIFICACIONES FÍSICAS					
Altura	Ancho	Espesor	Peso	Número de células serie y paralelo	TONC
1310 mm	969 mm	40 mm	17 Kg.	36 y 2	47 °C
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS					
Potencia máxima	Intensidad de cortocircuito	Tensión de circuito abierto	Intensidad de máxima potencia	Tensión de máxima potencia	
110 W (*)	6,76 A(*)	21,6 V(*)	6,32 A(*)	17,4 V(*)	
ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS					
<ul style="list-style-type: none"> • Celdas cuadradas de silicio monocristalino. • Células texturadas químicamente y con capa antireflexiva. • Contactos redundantes, múltiples en cada célula. • Circuito laminado entre dos capas de EVA (etilen-vinil acetato) • Marco de perfil de aluminio anodizado. • Cara frontal protegida con vidrio templado de alta transmisividad. • Cara posterior protegida con Tedlar de varias capas. • Cajas de conexionado incluyendo diodo de bypass. • Toma de tierra exterior. 					

(*) Valores de intensidad, tensión y potencia en condiciones CEM.

Las curvas de funcionamiento de este modelo para distintas condiciones de temperatura e irradiancia se expondrán en sucesivos gráficos.

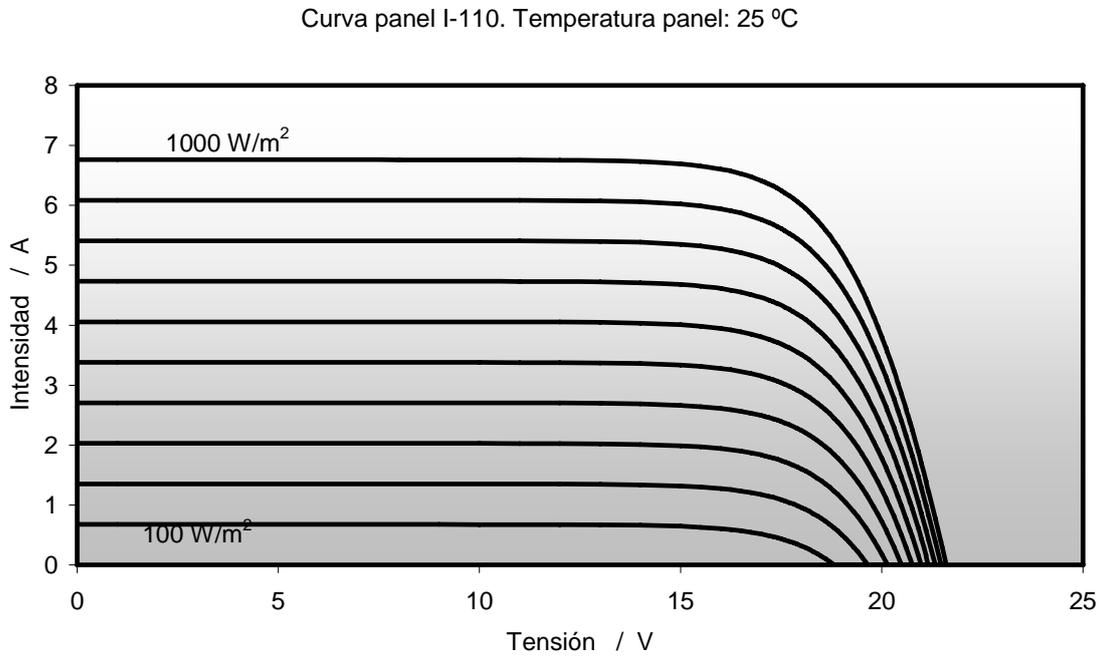


Figura 4.1.9. Curva característica del módulo I-110 para una temperatura del mismo de 25 °C y una irradiancia variable desde 100 W/m² a 1000 W/m².

Curva panel I-110. Temperatura panel: 25 °C

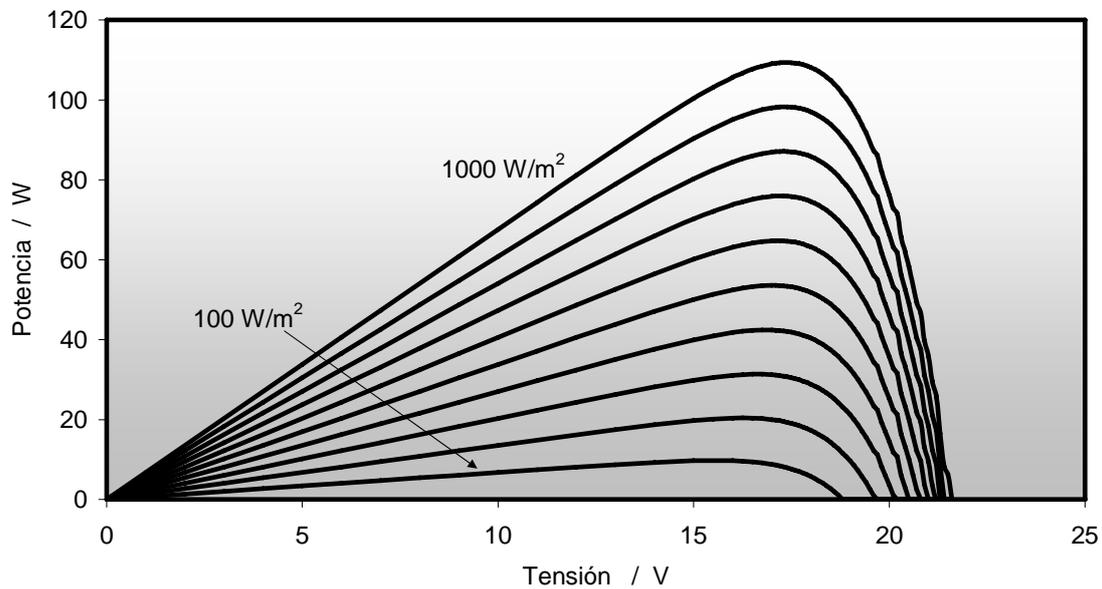


Figura 4.1.10. Curva característica del módulo I-110 para una temperatura del mismo de 25 °C y una irradiancia variable desde 100 W/m² a 1000 W/m².

Curva panel I-110. Irradiancia: 1000 W/m²

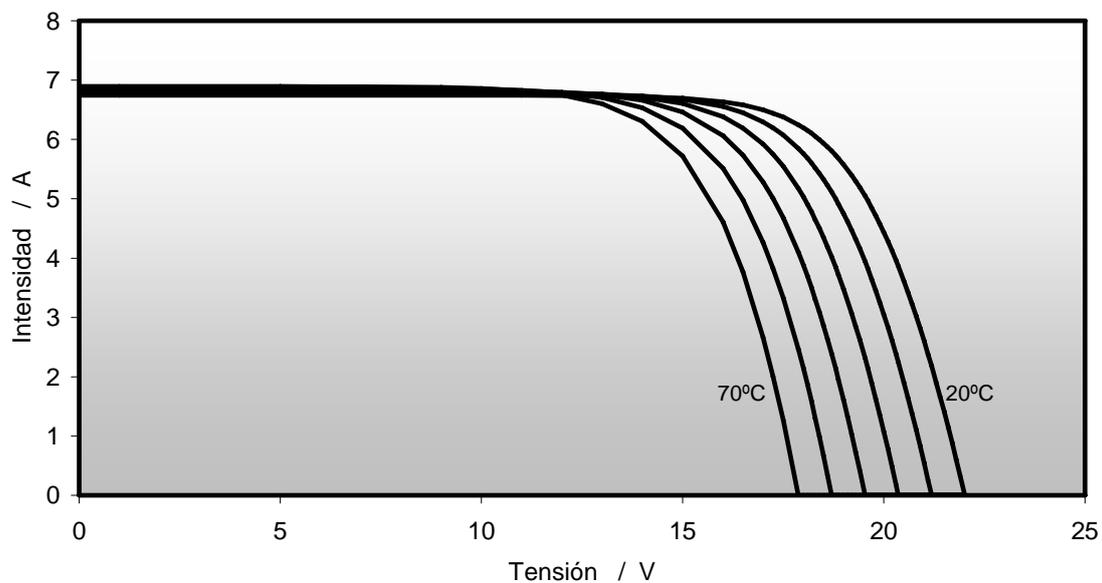


Figura 4.1.11. Curva característica del módulo I-110 para un nivel de irradiancia de 1000W/m² y una temperatura del módulo variable desde 20°C a 70°C.

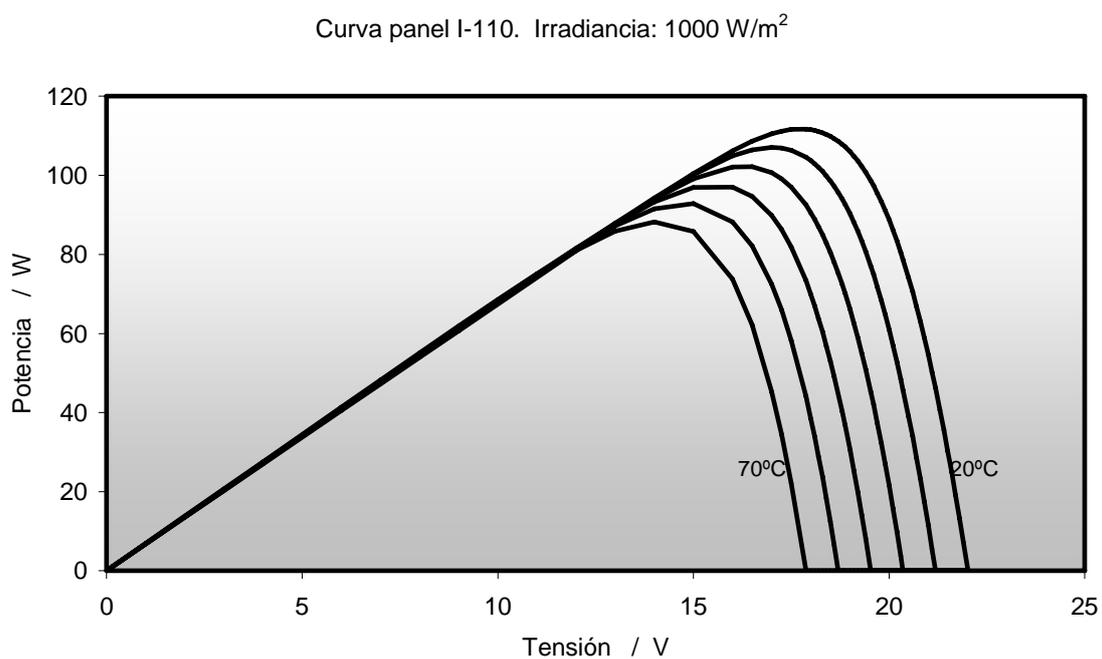


Figura 4.1.12. Curva característica del módulo I-110 para un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura del módulo variable desde 20°C a 70°C .

4.2. CONCEPTO DE FUNCIÓN UTILIZABILIDAD FOTOVOLTAICA:

Se define la función de utilizabilidad fotovoltaica $\phi_p(I_c)$ en el periodo $[t_1, t_2]$ mediante la ecuación 4.2.1.

$$\phi_p(I_c) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_c(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} I(t) dt} = \frac{H_c(I_c)}{H_g} \quad [4.2.1]$$

Físicamente $\phi_p(I_c)$ indica la relación entre la irradiación global solar que incide con un nivel de irradiancia superior a I_c , $H_c(I_c)$, y la irradiación solar total incidente H_g en el plano del módulo, durante el periodo $[t_1, t_2]$. En las figuras 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3 se puede observar el origen de la función de utilizabilidad fotovoltaica, para el día representado en la figura 4.2.1.

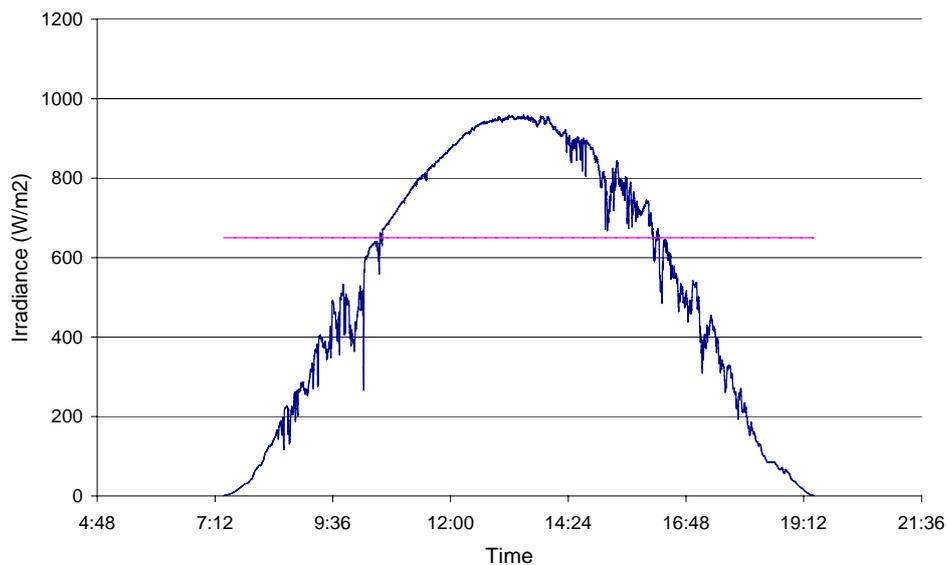


Figura 4.2.1. Irradiancia global horizontal.

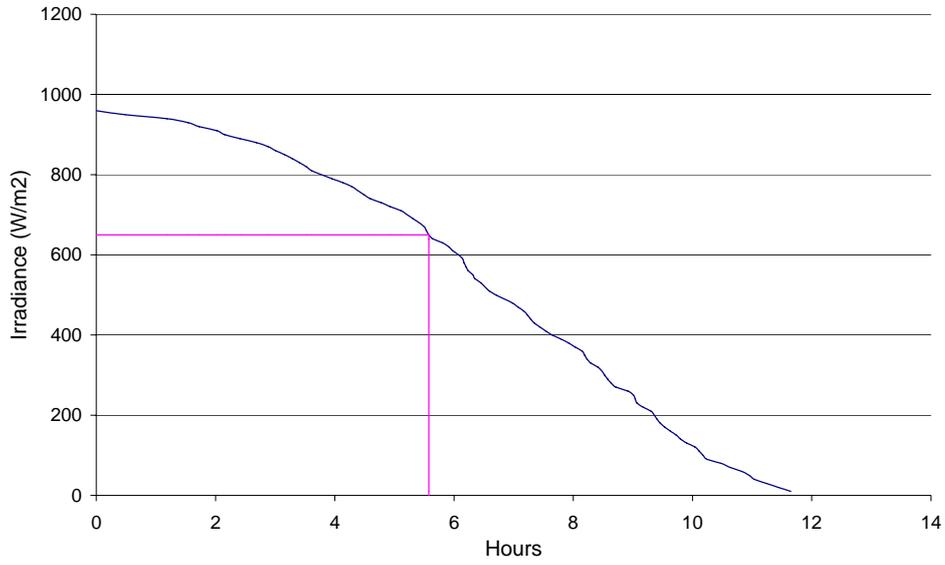


Figura 4.2.2. Curva de frecuencia acumulada del día.

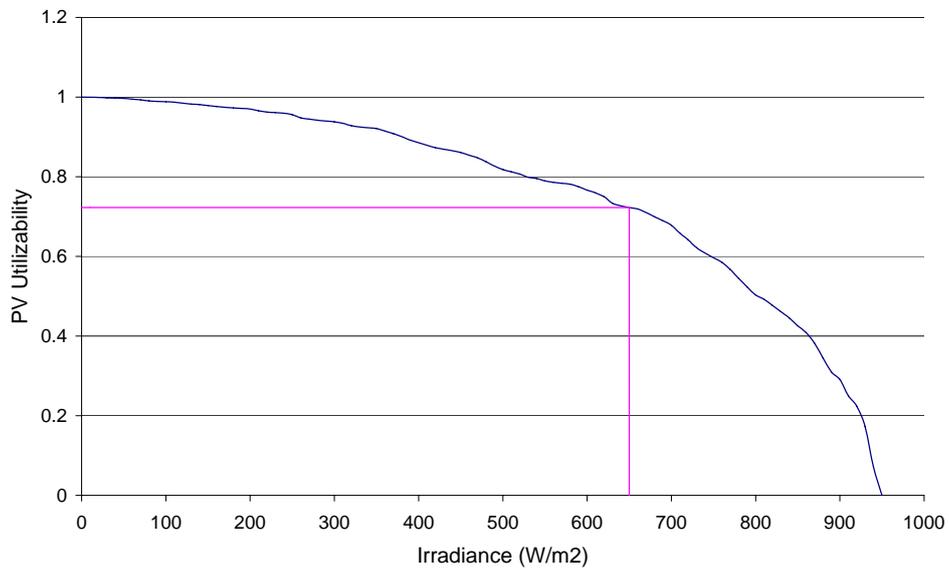


Figura 4.2.3. Función de utilizabilidad PV del día.

4.2.1 INTERVALOS DE TIEMPO DE LA FUNCIÓN DE UTILIZABILIDAD FOTOVOLTAICA.

La función utilizabilidad fotovoltaica se puede determinar para distintos intervalos de tiempo:

- función de utilizabilidad PV horaria media mensual, $\phi_{Phm}(I_c)$ sobre periodos horarios mensuales (por ejemplo, de 9-10 a.m. en enero),
- función de utilizabilidad PV diaria media mensual, $\phi_{Pdm}(I_c)$ calculada sobre periodos diarios para cada mes (por ejemplo, un día medio en enero),
- función de utilizabilidad PV media mensual, $\phi_{Pmm}(I_c)$,
- función de utilizabilidad PV media anual, $\phi_{Pym}(I_c)$.

Las ventajas e inconvenientes de cada una se pueden resumir en que al aumentar el intervalo de tiempo en el que se calcula la función, disminuimos la precisión pero simplificamos el cálculo ya que reducimos el número de datos. En otros casos el cálculo puede venir determinado por los datos de irradiancia disponibles. La función media anual $\phi_{Pym}(I_c)$, posee ventajas adicionales en el diseño de instalaciones fotovoltaicas, como es el cálculo inmediato de la energía anual que suministra la instalación. De estas definiciones se deduce que el intervalo de tiempo usado en los cálculos depende de la precisión requerida, del tipo de instalación y de los datos disponibles en cada situación particular.

4.2.2 NIVELES DE IRRADIANCIA I_c EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.

Según el nivel de precisión que se necesite en la estimación del comportamiento de la instalación fotovoltaica así se elegirán los niveles de irradiancia incidente I_c , para aplicar el concepto de Función de Utilizabilidad. Se ha comprobado que no es necesario conocer la función de utilizabilidad fotovoltaica para cualquier nivel de irradiancia sino que es suficiente conocer esta función sólo para ciertos niveles de irradiancia, en el caso que nos ocupa es suficiente que los niveles de irradiancia varíen desde 0 W/m^2 hasta 1000 W/m^2 en intervalos de 100 W/m^2 , para los doce meses del año.

4.2.3 APLICACIÓN.

La función de utilizabilidad se puede calcular en valores horarios, diarios, mensuales o anuales, en función de la precisión deseada, de la aplicación y de los datos disponibles. Se expone, a título de ejemplo y de forma general, en la gráfica 4.2.5 el valor de la función de utilizabilidad para la ciudad de Sevilla, para una inclinación de 30° , orientación sur y para cualquier valor de irradiancia crítica (W/m^2). En la gráfica 4.2.4 se muestra la irradiación diaria media disponible (kWh/m^2) sobre un plano inclinado 30° en la ciudad de Sevilla para valores por encima de cierta irradiancia (W/m^2).

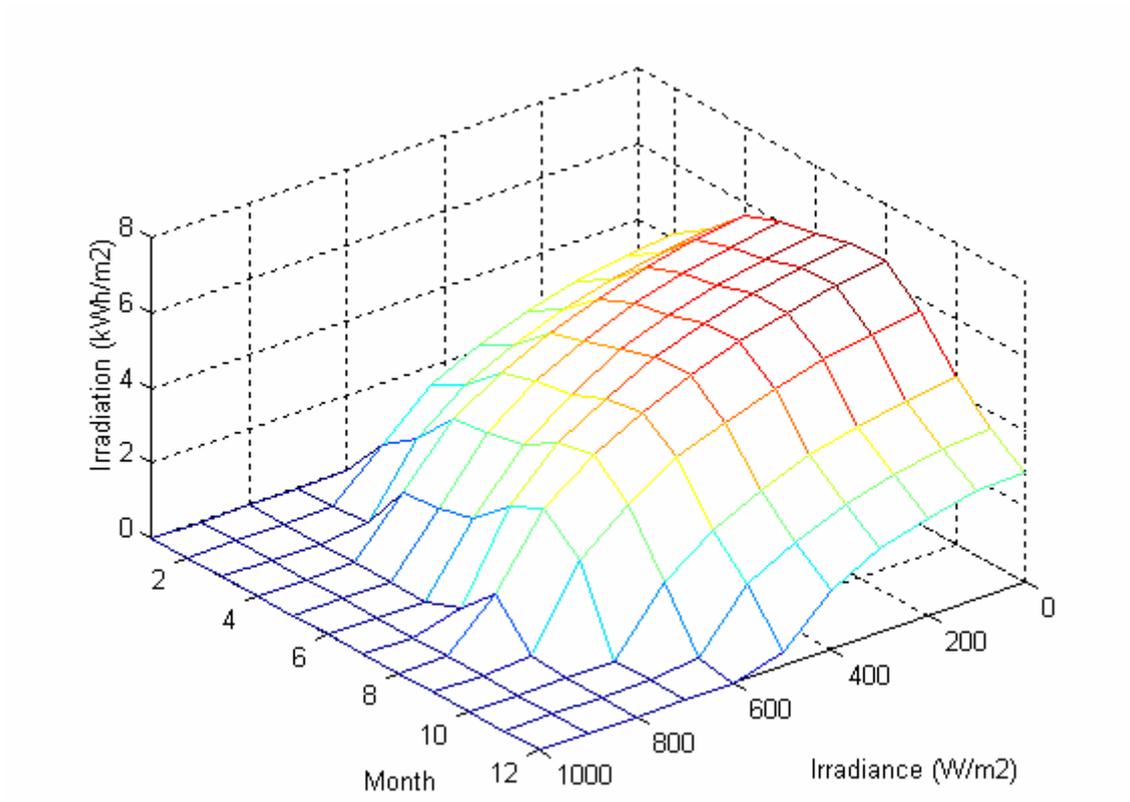


Figure 4.2.4. Valores de irradiación diaria media mensual(kWh/m²) por encima de ciertos valores de irradiancia (W/m²). Inclinación 30°. Sevilla

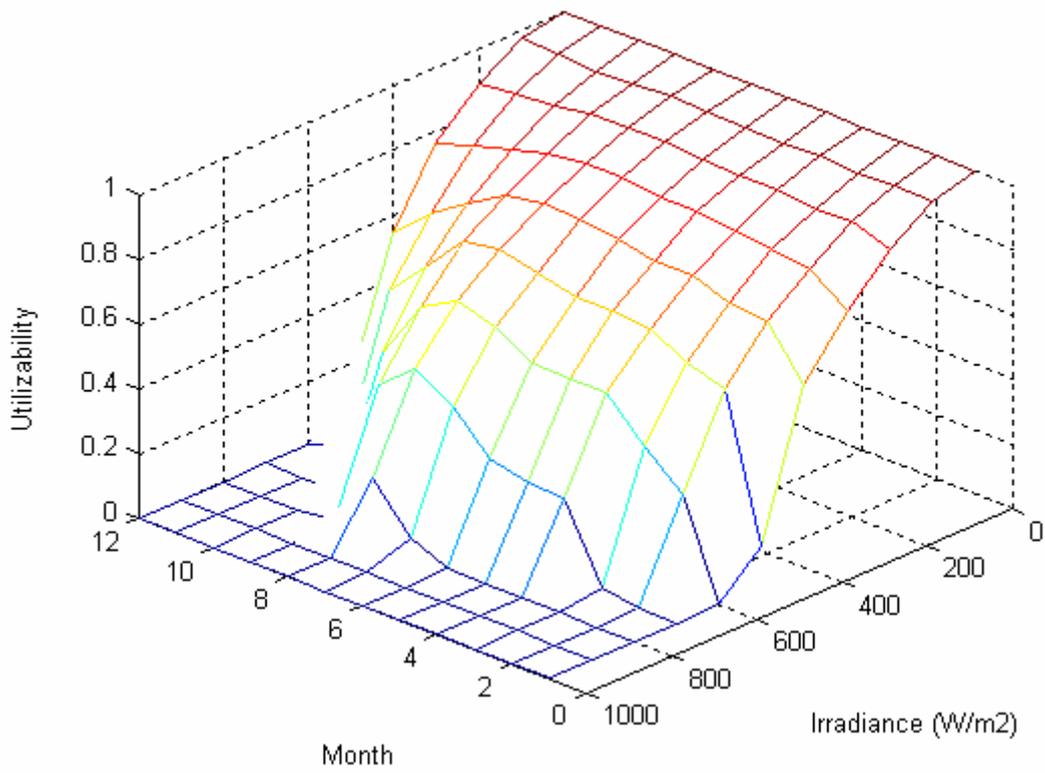


Figure 4.2.5. Función de utilizabilidad diaria media mensual para distintos valores de I_c (W/m^2).
Inclinación 30° . Sevilla

4.3. METODOLOGÍA DE UTILIZABILIDAD.

El funcionamiento de un módulo fotovoltaico depende básicamente y fundamentalmente de la irradiación incidente y sobre todo de su distribución por niveles de irradiancia. En este trabajo se pretende conocer que proporción de la irradiación incidente se convierte en energía eléctrica útil.

Para poder calcular esta energía, se utiliza una metodología de cálculo que se basa en el cálculo de la función utilizabilidad. Este parámetro se puede calcular para distintos intervalos de tiempo: horaria media mensual, diaria media mensual, media mensual y media anual. En este proyecto se utilizarán los dos últimos, los intervalos de tiempo media mensual y la media anual, que como se vio anteriormente nos permite realizar los cálculos de forma fiable y así reduciendo en número de datos.

La base de datos de que se dispone pertenece a los datos experimentales de cuatro instalaciones fotovoltaicas más los datos obtenidos del programa Meteonorm. Los datos realmente necesarios para el cálculo de esta metodología son los de irradiancia y la temperatura ambiente para todo el año.

Pero la Base de Datos de los datos experimentales aporta mucha más información, la cual será necesaria para la comparación de resultados obtenidos en esta metodología de cálculo.

Con estos datos de partida se puede calcular la energía eléctrica producida en las instalaciones fotovoltaicas por medio de la siguiente metodología:

4.3.1 PRODUCCIÓN ENERGÉTICA.

La producción energética se estima mediante las ecuaciones 4.3.1 y 4.3.2. Dichas producciones eléctricas son:

- La producción eléctrica a la salida del campo_PV (corriente continua) que en la ecuación es $E_A (t_1, t_2)$. Es decir, la máxima producción eléctrica que puede tener la instalación.
- La producción eléctrica útil.(corriente alterna) que en la ecuación se representa por $E_u (t_1, t_2)$. Que es la energía eléctrica que está conectada a la red.

$$E_A (t_1, t_2) = A \cdot \sum_{t=t_1}^{t=t_2} \sum_{i=0}^{i=1000} (\eta_A (\frac{I_i + I_{i+1}}{2}, T_{M_i}) \cdot H_t \cdot (\phi_t (I_i) - \phi_t (I_{i+1})))$$

$$E_u (t_1, t_2) = A \cdot \sum_{t=t_1}^{t=t_2} \sum_{i=0}^{i=1000} (\eta_A (\frac{I_i + I_{i+1}}{2}, T_{M_i}) \cdot \eta_i (\frac{I_i + I_{i+1}}{2}) \cdot H_t \cdot (\phi_t (I_i) - \phi_t (I_{i+1})))$$

Ecuaciones [4.3.1] y [4.3.2]

Estas ecuaciones permiten calcular la energía a la salida del campo solar y la energía útil inyectada a la red por una instalación fotovoltaica en el intervalo $[t_1, t_2]$. Para aplicar estas ecuaciones es necesario conocer varios parámetros.

Estos parámetros son:

- A : Es el área total de módulos fotovoltaicos.
- η_{A_i} : Rendimiento del campo solar teniendo en cuenta las pérdidas en el cableado, suciedad y tolerancia de los módulos.
- I_i : Nivel de irradiancia en el nivel i de irradiancia.
- I_{i+1} : Nivel de irradiancia en el nivel $i+1$ de irradiancia.
- T_{M_i} : Temperatura del módulo.
- H_t : Irradiación total en el periodo t .
- $\phi_t(I_i)$: Función utilizabilidad en el nivel i de irradiancia.
- $\phi_t(I_{i+1})$: Función utilizabilidad en el nivel $i+1$ de irradiancia.
- η_i : Rendimiento del inversor.

Para poder calcular estos parámetros se necesitan las siguientes curvas características:

- Las curvas características de los módulos
- Las curvas características del inversor

Ambas son proporcionadas por los fabricantes.

Las curvas necesarias para los módulos son las curvas características para cualquier condición de I – V.

Curva panel I-110. Temperatura panel: 25 °C

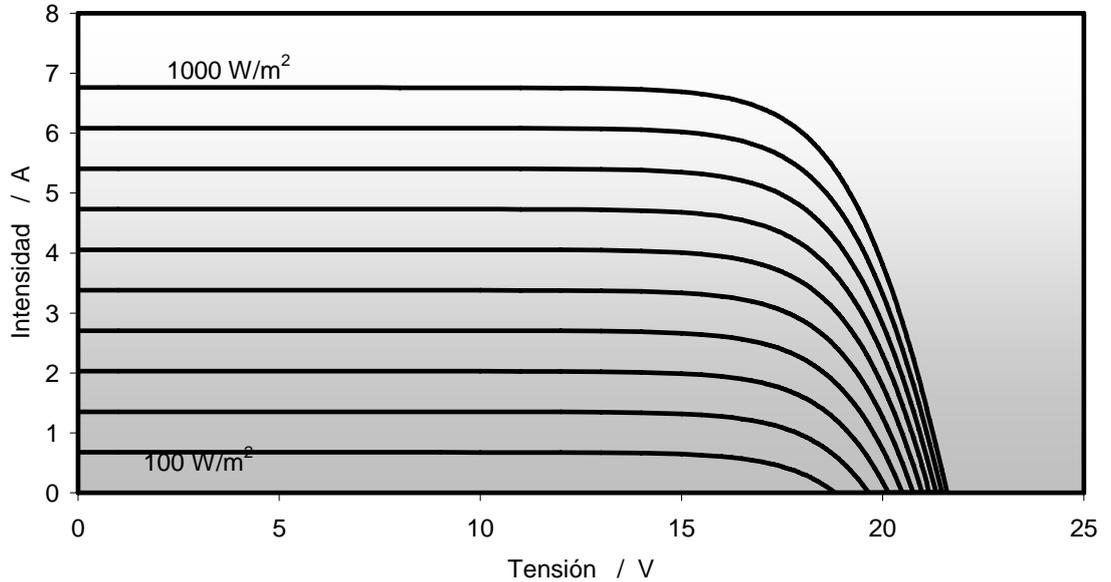


Figura 4.3.1 Curva característica de un módulo fotovoltaico.

Y también es necesario la curva de rendimiento del inversor, para poder calcular la eficiencia que existe en dicho inversor según sea el nivel de potencia eléctrica.

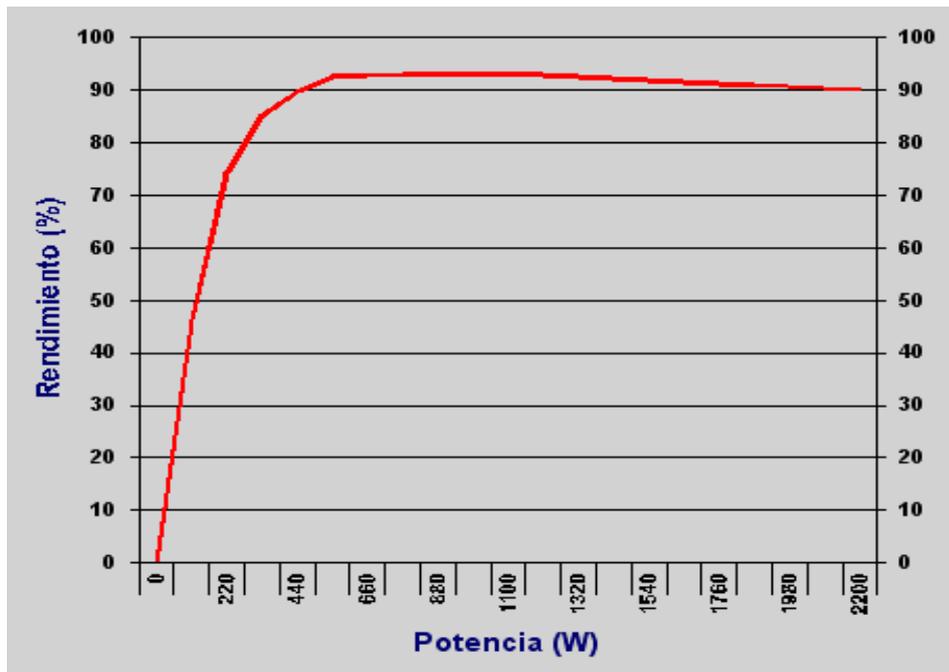


Figura 4.3.2 Curva de rendimiento del inversor Sunny 2500 W

Los valores de temperatura del módulo se estiman mediante la ecuación 4.3.3.

$$T_{M_i} = T_{AMB_i} + \frac{TONC - 20}{800} \cdot I_i \quad [4.3.3]$$

La temperatura de los paneles dependerá de cada nivel de irradiancia, por lo tanto se obtienen 11 valores de temperatura, uno para cada nivel de irradiancia incidente.

El rendimiento del campo solar se obtuvo mediante la curva característica de los módulos (η_{mp}), suponiendo que trabajan siempre en el punto de máxima potencia. Para el cálculo de esta potencia se necesitan los datos de temperatura de los paneles y el nivel de irradiancia incidente. Se ha considerado una velocidad de viento general de 1 m/s.

$$\eta_{mp_i} = \frac{P}{I_i \cdot A} \quad [4.3.4]$$

Además se tienen en cuenta un 5 % de pérdidas debido al cableado, suciedad y tolerancia de los módulos PV ($k_1 = 0.95$). Su fórmula es la siguiente:

$$\eta_{A_i} = \eta_{mp_i} \cdot k_1 \quad [4.3.5]$$

El rendimiento del inversor se calcula por medio de la curva de rendimiento aportada por el fabricante. El dato necesario es la energía eléctrica producida en el grupo fotovoltaico.

Con esta metodología se puede calcular la producción eléctrica que existe en la instalación.

En la siguiente parte del proyecto se compara estos resultados con los aportados por la instalación fotovoltaica.

Esta comparativa se realiza por medio de los errores relativos entre los valores obtenidos experimentalmente y los calculados con la anterior metodología para los distintos meses del año y para la media anual. Se calculan de la siguiente manera:

$$D_U = \left(1 - \frac{E_U (\text{Measured})}{E_U (\text{Estimated})} \right) \cdot 100 \quad [4.3.6]$$

$$D_A = \left(1 - \frac{E_A (\text{Measured})}{E_A (\text{Estimated})} \right) \cdot 100 \quad [4.3.7]$$

Siendo:

- D_U : % de error relativo de la energía útil inyectada a la red.
- D_A : % de error relativo de la energía eléctrica producida en el campo solar.

4.4. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES:

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES.

Existen cuatro instalaciones monitorizadas fotovoltaicas en este proyecto. Tres de ellas se encuentran en la provincia de Sevilla mientras que la cuarta esta situada en el municipio de Larva (Jaén). A continuación se presentarán las características de cada una de ellas:

Las instalaciones ubicadas en Sevilla son idénticas, y sus características son:

- Ubicación: Sevilla
- Empresa Instaladora: Gamesa Solar

Características técnicas:

- Potencia fotovoltaica instalada: 5.936 Wp
- Potencia y número de módulos fotovoltaicos: 56 x 106 Wp (módulos Gamesa)
- Potencia nominal y número de inversores: 2 x 2500 W (inversores Fronius)
- Orientación del generador fotovoltaico: Sur
- Inclinación del generador fotovoltaico: 30° respecto a la horizontal

De estas tres instalaciones fotovoltaicas se obtienen los siguientes datos a lo largo del año 2004:

- Intervalo de medida: 10 min.

De cada uno de los dos inversores se reciben las siguientes medidas:

- Energía (Wh)
- Potencia en AC (W)
- Tensión de red (V)
- Corriente en AC (A)
- Tensión en DC (V)
- Corriente en DC (A)
- Temperatura en módulos (°C) (sonda en parte trasera de los módulos)
- Temperatura ambiente (°C) (sonda a la intemperie en la sombra)
- Radiación (W/m^2) (célula calibrada)

Las características de los elementos que intervienen en la instalación se recogen en la siguiente tabla 4.4.1:

Características eléctricas del módulo I-106	
Potencia	106 Wp
Corriente de cortocircuito	6,54 A
Corriente de máxima potencia	6,1 A
Tensión de circuito abierto	21,6 V
Tensión de máxima potencia	17,4 V
Características eléctricas del inversor Fronius IG30	
Rango de Tensiones MPP	150 - 400 V
Tensión máxima de entrada	500 V
Potencia de Salida de Campo PV	2500-3500 Wp
Intensidad máxima de entrada	18 A
Potencia nominal de salida	2500 W
Potencia máxima de salida	2600 W
Tensión de red	220/230 V
Frecuencia	49-51 Hz
Distorsión máxima de intensidad inyectada a red	< 3.5 %
Eficiencia máxima	94.5 %

Tabla 4.4.1 Características de los elementos de la instalación fotovoltaica de Sevilla

Todas las instalaciones tienen un esquema unificar como el de la figura 4.4.1, en donde cada subgrupo tiene un total de 28 paneles fotovoltaicos I -106.

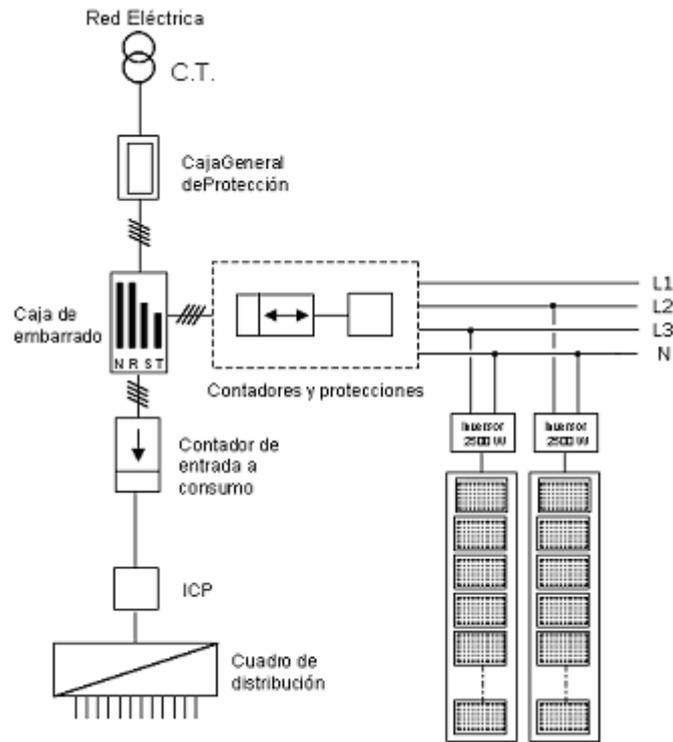


Figura 4.4.1 Esquema unificar de las instalaciones PV de Sevilla.

Para la otra instalación fotovoltaica, estas son las características:

- Ubicación: Larva. (Jaén). Entorno Natural.
- Empresa Instaladora: Solar Jiennense.

Características técnicas:

- Potencia fotovoltaica instalada: 14.850 Wp
- Número de módulos fotovoltaicos: 135
- Potencia por módulo fotovoltaico: 110 Wp (I-110 de Isofotón)
- Potencia nominal inversor: 12.600 W
- Nº de inversores: 3 x 2500 W, 6 x 850 W (Sunny Boys)
- Orientación del generador fotovoltaico: Sur
- Inclinación del generador fotovoltaico: (dispone de plataforma con dos posibles inclinaciones 20° y 55°). Hasta ahora la inclinación ha permanecido fija a 16°.

De cada uno de los dos inversores se reciben las siguientes medidas:

Datos recibidos:

Intervalo de medida: 15 min.

Las variables medidas en la instalación del Ayuntamiento de Larva se clasifican en dos bloques, en función de si se miden en cada inversor (Sunny Boy) o en el sistema de control y adquisición de datos de la instalación fotovoltaica (Sunny Boy Control Plus). El periodo de muestreo es de 15 minutos.

En cada inversor Sunny Boy se mide:

- Intensidad media en continua a la salida del campo fotovoltaico (I_{pv})
- Tensión media en continua de salida del campo fotovoltaico (V_{pv})
- Intensidad media a la salida del inversor (I_{ac})
- Tensión media a la salida del inversor (U_{ac})
- Frecuencia media de la señal a la salida del inversor (F_{ac})
- Potencia activa media generada a la salida del inversor (P_{ac})
- Energía acumulada generada a la salida del inversor (E_{total})

En el Sunny Boy Control Plus se mide:

- potencia activa media total generada por la instalación a la salida de inversores (PAC)
- energía total acumulada generada por la instalación a la salida de inversores (ETOTAL)
- energía total diaria generada por la instalación a la salida de inversores (ETODAY)
- horas acumuladas de funcionamiento de la instalación (OPTIME)
- encendido o apagado de la instalación (POWERON)
- estado o modo de funcionamiento de la instalación (STATE)
- detector del mal funcionamiento de la instalación (ERROR)
- irradiancia global sobre el plano de los módulos fotovoltaicos (RGSi) (mediante célula calibrada)
- temperatura ambiente (TAMB)
- temperatura de los módulos fotovoltaicos (TMOD)

Las características de los elementos que intervienen en la instalación se recogen en la siguiente tabla 4.4.2:

Características eléctricas del módulo I-110	
Potencia	110 Wp
Corriente de cortocircuito	6,76 A
Corriente de máxima potencia	6,32 A
Tensión de circuito abierto	21,6 V
Tensión de máxima potencia	17,4 V
Características eléctricas del inversor Sunny Boy 2500	
Tensión mínima de entrada	275 V
Tensión máxima de entrada	550 V
Tensión mínima de salida	198 V
Tensión máxima de salida	251 V
Potencia nominal	2.200 W
Potencia máxima de salida	2.500 W
Tensión de red	220/230 V
Frecuencia	49-51 Hz
Distorsión máxima de intensidad inyectada a red	< 4%
Rendimiento aproximado	94%
Características eléctricas del inversor Sunny Boy 850	
Tensión mínima de entrada	125 V
Tensión máxima de entrada	250 V
Tensión mínima de salida	198 V
Tensión máxima de salida	251 V
Potencia nominal	850 V
Potencia máxima de salida	900 V
Tensión de red	220/230 V
Frecuencia	49-51 Hz
Distorsión máxima de intensidad inyectada a red	< 4%
Rendimiento aproximado	93%

Tabla 4.4.2 Características de los elementos de la instalación fotovoltaica de Jaén.

Toda la instalación tiene el siguiente esquema unifilar, en donde existen varias subestaciones fotovoltaicas, exactamente 3 estaciones de 2500 W y 6 estaciones de 850 W, la subestación de 2500 W tiene 25 módulos mientras que la de 850 W contiene 10 paneles fotovoltaicos I -110.

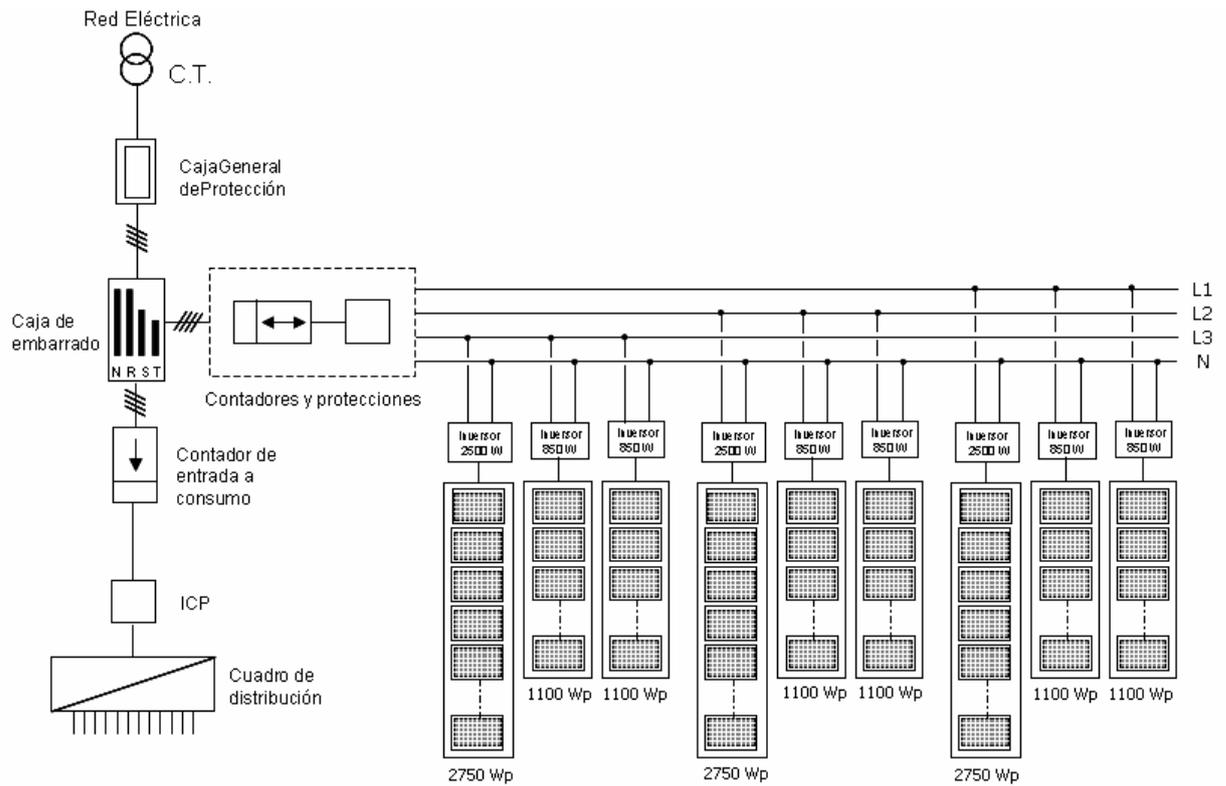


Figura 4.4.2 Esquema unifilar de las instalaciones PV de Jaén.