



**FACULTAD DE METALURGIA - ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de Diploma para optar por el título de Ingeniero Eléctrico**

## **Dimensionado de un sistema fotovoltaico para viviendas de la región oeste de Argelia**

**Autor: Hamma Hasanna Salek**

**Tutores: Ms.C. Reineris Montero Laurencio**

**Ing. Liomnis Osorio Laurencio**

**Moa, Junio de 2014**

**“Año 56 de la Revolución”**



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Hamma Hasanna Salek autor de este Trabajo de Diploma y los tutores Ms.C. Reineris Montero Laurencio e Ing. Liomnis Osorio Laurencio declaramos la propiedad intelectual de esta investigación a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) para que disponga de su uso con fines docentes.

---

Hamma Hasanna Salek

---

M. Sc. Reineris Montero Laurencio

---

Ing. Liomnis Osorio Laurencio



### *Agradecimientos*

*Agradezco en primer lugar y con todo mi corazón a mis padres Jadya Abeid Sidi-Alí y Hasanna Salek, por el sacrificio y confianza depositada en mí para que pudiese llegar a lo que soy hoy, a mi abuela Neytu Larusy a mis tíos y tías a mis hermanos Abdu Hasanna y muy especialmente a mis sobrinos, a los amigos que contribuyeron a que este sueño fuese realidad, y a todos aquellos que dejaron de existir y que llevo presente en cada paso de mi vida.*

*Agradezco a todos los compañeros de aula, por toda la ayuda que me brindaron, a mis compañeros de cuarto que como hermanos siempre me ayudaron en todo.*

*Agradezco a todos los profesores y de manera especial a mis tutores por sus conocimientos brindados para garantizar el éxito de este trabajo.*

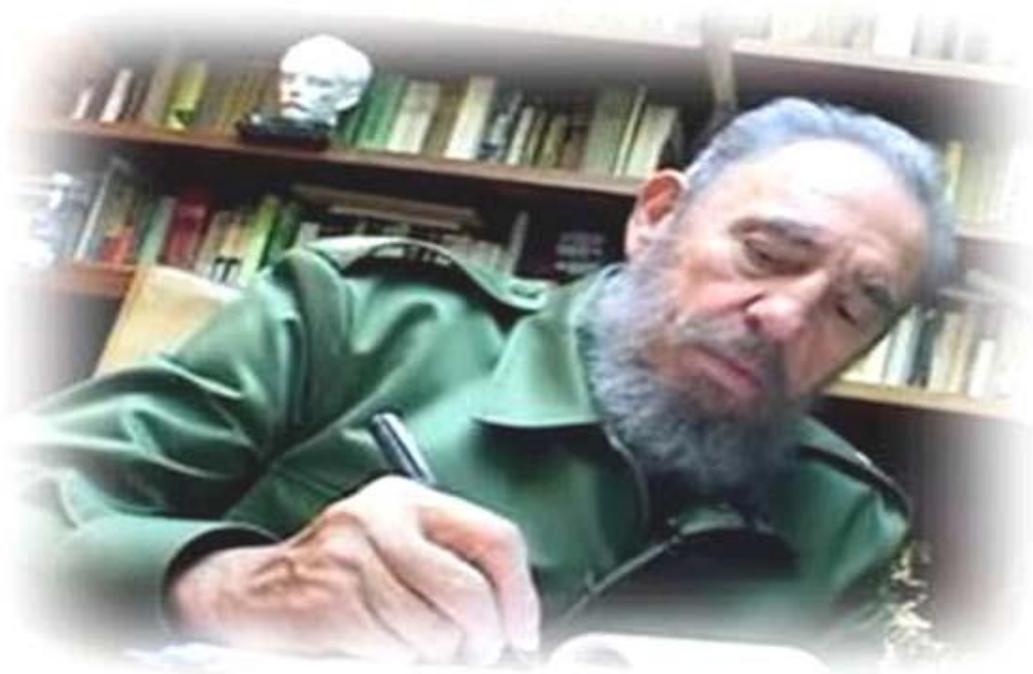
*Agradezco a Dios por haberme permitido conocer esta Revolución Socialista y a nuestro eterno Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por darme la oportunidad de forjarme como persona culta y preparada en la especialidad de Ingeniería Eléctrica. Mis agradecimientos a Abdati Breika por su carisma y fe, al gobierno de la R.A.S.D.*

*Muchas Gracias a todos.*

*Dedicatoria*

*Dedico este Trabajo de Diploma a toda mi familia, en especial a mi madre Jadya Abeid Sidi-alí, a mi padre Hasanna Salek, mis hermanas, y especialmente a mi hermano Abdu Hasanna a mis tíos y tías, a Abdati Breika y al gobierno de la R.A.S.D .Dedico este trabajo a todos los mártires caídos en la guerra, mis amistades y muy especialmente a mis sobrinos, todos muchas gracias por existir...*

## Pensamiento



*[...] El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencias, tiene que ser un futuro de hombres de pensamientos, porque precisamente es lo que estamos sembrando; lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia [...]*

*Fidel Castro Ruz*

## Resumen

En la presente investigación se realiza el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo para electrificar las viviendas de Tindouf localizadas al oeste de Argelia, más conocidas como Jaimas. Se selecciona para los cálculos el método manual propuesto por Aguilera y Hontoria en el 2012 debido a la carencia de software especializado. Se implementó el método seleccionado en una hoja de cálculo en Microsoft Excel permitiendo las correcciones oportunas. Para el dimensionado del sistema se realizó un tratamiento estadístico de las variables climatológicas de la localidad, considerando como variables más importantes la irradiación solar y la temperatura ambiente. Estos datos indican niveles de irradiación promedio diaria de 3.16 y 8.11 kWh/m<sup>2</sup> para toda la variabilidad del clima de esta zona desértica.

Los resultados del dimensionado indican que se requieren 5 paneles fotovoltaicos de 250 Wp conectados en paralelo para satisfacer el consumo diario de 3.514 kWh de una vivienda.

Finalmente se empleó una aplicación en Matlab para determinar la influencia de las altas temperaturas en el comportamiento de los paneles fotovoltaicos propuestos. Las simulaciones realizadas demostraron que a la temperatura máxima promedio de 41.98 °C, el valor de la potencia máxima disminuye aproximadamente un 10.36 %.

## Summary

In the present investigation the sizing of an autonomous photovoltaic system is made to electrify homes located Tindouf in western Algeria, better known as Jaimas. Select to calculate the proposed by Aguilera & Hontoria in 2012 manual method due to lack of specialized software. The selected method was implemented in a spreadsheet in Microsoft Excel allowing the necessary corrections. To design the system, a statistical analysis of climatic variables of the town was carried out, as the most important variables solar radiation and ambient temperature. These data indicate average daily radiation levels 3.16 and 8.11 kWh/m<sup>2</sup> for all climate variability in this desert area.

The results indicate that 5 sized 250 Wp PV panels connected in parallel to meet the daily consumption of 3.514 kWh of housing required.

Finally Matlab application is used to determine the influence of high temperature on the behavior of the proposed photovoltaic panels. Simulations showed that the average maximum temperature of 41.98 °C, the value of the maximum power decreases about 10.36%.

## Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>CAPITULO I. Marco teórico contextual de la investigación</b> .....	4
1.1 Introducción .....	4
1.2 Estado actual de la tecnología solar fotovoltaica .....	4
1.3 Aspectos técnicos de la tecnología solar fotovoltaica. ....	6
1.3.1 Conceptos y terminologías de la energía fotovoltaica.....	10
1.3.2 Componentes de los sistemas fotovoltaicos autónomos.....	13
1.4 Energía fotovoltaica en el contexto de Argelia .....	15
1.4.1 Características geográficas y sociales de Tindouf para la electrificación con energía fotovoltaica.....	15
<b>CAPÍTULO II. Materiales y métodos</b> .....	18
2.1 Introducción .....	18
2.2 Métodos de dimensionado .....	18
2.3 Método propuesto para el dimensionado de SFVA.....	19
2.4 Factores que afectan a la característica I-V del panel fotovoltaico .....	29
2.4.1 Efecto de la intensidad de iluminación (Irradiancia) .....	29
2.4.2 Efecto de la temperatura .....	30
2.5 Condiciones de referencia .....	32
2.5.1 Condiciones Estándares de Medida (STC) .....	32
2.5.2 Condiciones Nominales de Operación (CNO).....	33
2.6 Influencia de la temperatura de trabajo en el rendimiento de los módulos FV .....	34
2.7 Herramienta informática para el dimensionado.....	36
<b>CAPÍTULO III. Análisis de los resultados</b> .....	37
3.1 Introducción .....	37
3.2 Comportamiento de las variables climatológicas de Tindouf .....	37
3.3 Equipamientos para SFVA disponibles en el mercado .....	42
3.4 Determinación del consumo.....	42
3.5 Determinación del ángulo óptimo.....	44
3.6 Dimensionado de los módulos fotovoltaicos .....	44
3.6.1 Estructura de soporte mecánica para el generador. ....	46
3.7 Dimensionado del sistema de acumulación .....	48



3.7.1 Características de la batería Sonnenschein Solar .....	49
3.8 Dimensionado del regulador .....	50
3.8.1 Características del regulador SumSol RS.....	50
3.9 Dimensionado del inversor.....	51
3.9.1 Características del inversor Phoenix.....	52
3.10 Dimensionado del cableado.....	53
3.11 Simulación de los módulos ISF-205.....	53
3.11.1 Influencia de la irradiancia en los módulos ISF-250.....	55
3.11.2 Influencia de la temperatura en los módulos ISF-250.....	58
3.12 Valoración económica del SFVA propuesto.....	59
3.13 Impacto ambiental del SFVA.....	60
<b>Conclusiones</b> .....	62
<b>Recomendaciones</b> .....	63
<b>Bibliografía</b> .....	64
<b>Anexos</b>	

## **Introducción**

El Sol ha sido utilizado por el hombre desde los comienzos de la historia. Con la actual crisis energética mundial resulta un desafío cambiar la matriz energética de los países, en donde inevitablemente debe insertarse el uso de las fuentes renovables de energía, especialmente la solar térmica y la fotovoltaica.

Entre los años 2001 y 2012 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. Si esta tendencia continúa, la energía fotovoltaica cubriría el 10 % del consumo energético mundial en 2018 alcanzando una producción aproximada de 2.200 TWh y podría llegar a proporcionar el 100 % de las necesidades energéticas actuales en torno al año 2027.

Programas de incentivos económicos, primero, y posteriormente sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios han apoyado la instalación de la fotovoltaica en un gran número de países, contribuyendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero.

Debido a los excelentes niveles de radiación solar incidentes en la geografía desértica, se hace favorable la implementación de tecnologías solares, particularmente la fotovoltaica. El clima de estas regiones es cálido y seco con temperaturas que alcanzan los 50 grados Celsius durante el día, permiten convertir estos niveles de radiación solar en electricidad.

## **Situación problemática**

Numerosos casos de comunidades aisladas se localizan en el continente africano. África tiene aproximadamente el 13 % de la población mundial y Solo consume el 3 % de la energía del planeta. En viviendas o comunidades totalmente separadas de la urbanización es muy costoso instalar una red general de electrificación, en estos casos puede ser más rentable instalar un sistema fotovoltaico.

Particularmente en regiones como Argelia se acentúa no solo la pobreza energética, también se incrementa el número de habitantes que viven en comunidades nómadas aisladas. Estas comunidades requieren de variantes de electrificación para poder solventar el riguroso clima desértico. Argelia está situada al norte de África y limita al este con Túnez al oeste con Marruecos y al sur con Mali. Su economía está basada en el petróleo y el gas natural, sin embargo, por las características geográficas y socioeconómicas no se asegura índices adecuados de electrificación.

La anterior situación problemática facilita la definición del **problema** de la investigación, el cual se puede expresar de la forma siguiente:

¿Cómo electrificar las viviendas en comunidades aisladas de la red eléctrica en el oeste de Argelia aprovechando los altos niveles de radiación solar existentes?

### **Objeto de estudio**

Viviendas de las comunidades aisladas de Tindouf en el oeste de Argelia.

### **Campo de acción**

Electrificación de viviendas mediante paneles solares fotovoltaicos.

### **Objetivo general**

Determinar las dimensiones de un arreglo de paneles solares fotovoltaicos autónomos que permitan electrificar viviendas en la provincia de Tindouf en el oeste de Argelia.

### **Hipótesis**

Si se caracterizan las variables climatológicas de la localidad de Tindouf y se determina el comportamiento de la demanda de potencia eléctrica en las viviendas, entonces, a partir de una metodología adecuada, se pueden determinar las dimensiones de los paneles solares fotovoltaicos autónomos que permitan electrificar estas viviendas.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar las variables climatológicas de las localidades de Tindouf.
2. Determinar la demanda de potencia eléctrica de las viviendas.
3. Proponer un sistema fotovoltaico autónomo que se adecue a las condiciones climatológicas y energéticas de las viviendas.

### **Tareas de la investigación**

- Sistematización de los parámetros climatológicos de la localidad.
- Estudio de la demanda eléctrica en las viviendas.
- Selección y aplicación de una metodología adecuada para el dimensionado de los paneles Soleres.
- Determinación de los diferentes parámetros de operación de los paneles solares fotovoltaicos seleccionados.
- Análisis de los resultados obtenidos y valoración técnico económico de la propuesta de electrificación mediante los paneles solares fotovoltaicos.

### **Principales métodos de investigación utilizados**

- Método de investigación documental y bibliográfica.
- Método de investigación teórico para dimensionar de forma adecuada los paneles fotovoltaicos.
- Método de Análisis y Síntesis: se empleó para dar explicación al problema, en la sistematización de las variables climatológicas más incidentes en la localidad directamente relacionadas con el objetivo del trabajo y en la determinación de la demanda de potencia de las viviendas.
- Simulación computacional: para determinar la influencia de la temperatura en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

## **CAPITULO I. Marco teórico contextual de la investigación**

### **1.1 Introducción**

En este capítulo se aborda la situación actual de la tecnología solar fotovoltaica y los principales aspectos teóricos que sustentan el método utilizado en la investigación. Por otra parte se realiza un análisis bibliográfico en referencia al tema de investigación en referencia al uso de la tecnología fotovoltaica en Argelia y particularmente se describe el entorno geográfico y social de la localidad de Tindouf, así como los aspectos climatológicos de la región que justifican el aprovechamiento de la energía solar a favor de la electrificación de las viviendas.

### **1.2 Estado actual de la tecnología solar fotovoltaica**

El artículo de (Breva 2014) asegura que la energía proveniente de tecnologías fotovoltaicas en 2013 fue del 35 % en todo el mundo. Según el estudio de EurObservER se instalaron 37 nuevos MW, destacando el espectacular crecimiento en China y Japón, mientras que en Europa decrece a la mitad del ritmo de la media mundial, 9.9 MW instalados en la UE durante 2013 frente a los 16.6 MW de 2012.

El mercado mundial FV va a crecer más rápidamente en los próximos años, 51 MW en 2014 y 100 MW en 2018, pasando de 136 MW totales a 500 MW en 2018 en todo el mundo, con un crecimiento anual entre el 35 % y 40 %, siendo los mercados de Asia, EE.UU. y África los más dinámicos (Breva 2014).

Las espectaculares tasas de crecimiento FV en el mundo para los próximos años se asientan en los márgenes de reducción de costos y de mayor eficiencia que la tecnología FV está observando en todo el mundo para convertirse en la principal fuente de generación. No hay ninguna otra tecnología energética que vaya a multiplicarse 3.6 veces antes de 2018.

Contrasta la tendencia mundial con el menor ritmo de crecimiento FV en Europa y revela una vez más, igual que en la crisis de la eurozona, la debilidad

geopolítica de las instituciones europeas frente al nuevo escenario de las renovables en el mundo.

El crecimiento mundial de la fotovoltaica tiene una explicación y es que, a mayor demanda de FV bajan sus costos y los precios de la energía, y a mayor demanda de gas, los precios se disparan.

En la próxima década, el 20 % de la generación mundial será de origen descentralizado debido, principalmente, a la reducción de costos de la FV. Pero a la vista de lo que está sucediendo en la presente década, la más rápida maduración y más rápida aplicación de la FV la convierte en la tecnología que va a sustituir el consumo de combustibles fósiles en los edificios y en el transporte. Esto supone una mejora significativa de la competitividad para todos los sectores de la economía.

El escenario fotovoltaico mundial según (Stolik 2014) se caracteriza por:

- Un ambiente propicio para las Fuentes Renovables de Energía (FRE).
- Gran aumento de la producción mundial FV.
- Fuerte disminución de costos FV.
- Predominio en más del 99 % de la FV conectada a la red eléctrica.
- Logro de la paridad del costo del kWh FV con el de la red convencional.
- Gran desarrollo tecnológico industrial automatizado.
- Liderazgo mundial FV de China.
- Predominio industrial de las celdas FV de silicio cristalino (Si-c).
- Ninguna tecnología energética ha crecido sostenidamente con ritmo similar a la FV.

En cuanto al tema de la producción y los costos se puede resumir que el Sistema Fotovoltaico (SFV) consta de celdas, módulos, inversores, cableado, y estructuras metálicas para los soportes. La producción mundial de celdas FV en el 2000 fue de 280 MW, en 2014 debe crecer más de 160 veces y continuará aumentando. China es líder en producción de celdas y módulos, con más del 60 % mundial. El líder en inversores es Alemania. El costo promedio de los

módulos FV ha caído unas 100 veces desde el 1975 a la fecha, situándose hoy en unos \$0.68 USD/W. Antes del 2020 se pronostica que estará en \$0.35 - \$0.40 USD/W.

La instalación mundial FV se ha concentrado en Europa, con incremento actual y en próximos años de China, Japón y Estados Unidos. Para que se tenga una idea de la potencia instalada en el mundo y en los próximos años se presenta el gráfico de la figura 1.1.

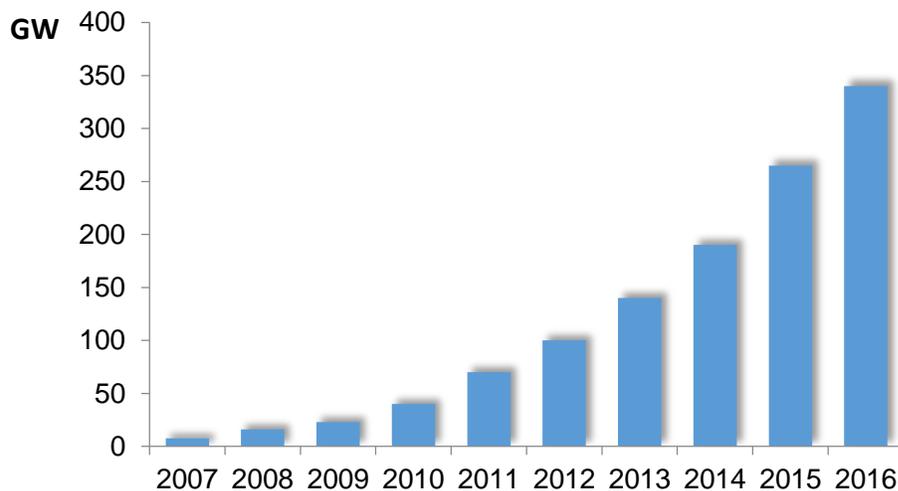


Figura 1.1 Potencia instalada en FV en el mundo.

Actualmente de los 140 GW instalados mundialmente más del 85 % es en techos y cubiertas, la que aumenta mucho cada año al igual que la de parques FV en suelos. Los países con más instalaciones FV acumuladas son en orden descendente los siguientes: Alemania, China, Italia, Japón, EEUU, España, Francia, Australia, Bélgica y Reino Unido.

### **1.3 Aspectos técnicos de la tecnología solar fotovoltaica.**

La energía solar fotovoltaica se perfila hoy, además, como una solución al problema de la electrificación rural por sus ventajas respecto a otras alternativas: no contamina ni produce ruidos, no necesita combustible ni mantenimiento, y, aunque con menor rendimiento, los sistemas solares

funcionan también en días nublados, captando la luz que se filtra a través de las nubes.

El principal problema en el aprovechamiento de la materia prima irradiada por el Sol es el factor económico. Si bien el costo de un sistema convencional de gas o electricidad para calentar agua es de un bajo costo inicial, estos sistemas consumen energía que cada vez tendrá un mayor valor. El suministro de energía solar es gratuito y los sistemas energéticos que trabajan con esta energía después de amortizadas las inversiones, solo llevan un gasto mínimo en mantenimiento. La tecnología fotovoltaica ofrece al usuario la oportunidad de autogenerar, al menos, parte de la energía eléctrica que consume, posibilitando la instalación de módulos fotovoltaicos conectados directamente a la red de distribución eléctrica.

Al efectuar comparaciones de rentabilidad económica de la energía solar frente a otras alternativas, hacerlo en toda su dimensión, es decir, sin olvidar los costos sociales y de prevención de riesgos de algunas instalaciones (por ejemplo, las centrales térmicas), que se presentan como más económicas que la alternativa solar no refleja un pensamiento sostenible. Por esta razón en todo el mundo se trabaja por disminuir los costos de producción de estas tecnologías fundamentalmente en el mejoramiento de la eficiencia de las celdas que para tecnologías convencionales está en el orden del 15 %.

El aprovechamiento de la energía solar está condicionado a la intensidad de radiación solar incidente sobre un área determinada, por lo que es necesario contar con registros de radiación confiables que puedan emplearse en el diseño de equipos que aprovechen la energía solar. Actualmente se disponen de mapas de radiación solar, en donde normalmente se presentan los valores promedio de radiación solar diaria, mensual o anual. El uso de estos mapas de radiación es importante para determinar las zonas geográficas que tienen un alto potencial para su aprovechamiento y para el pre diseño de los equipos que utilizan como fuente la energía solar. Actualmente, las tablas o los mapas de radiación solar se elaboran a partir de mediciones vía satélite. En la figura 1.2

se presenta el mapa de irradiación solar mundial donde aparecen los países con mayor potencial para la generación FV.

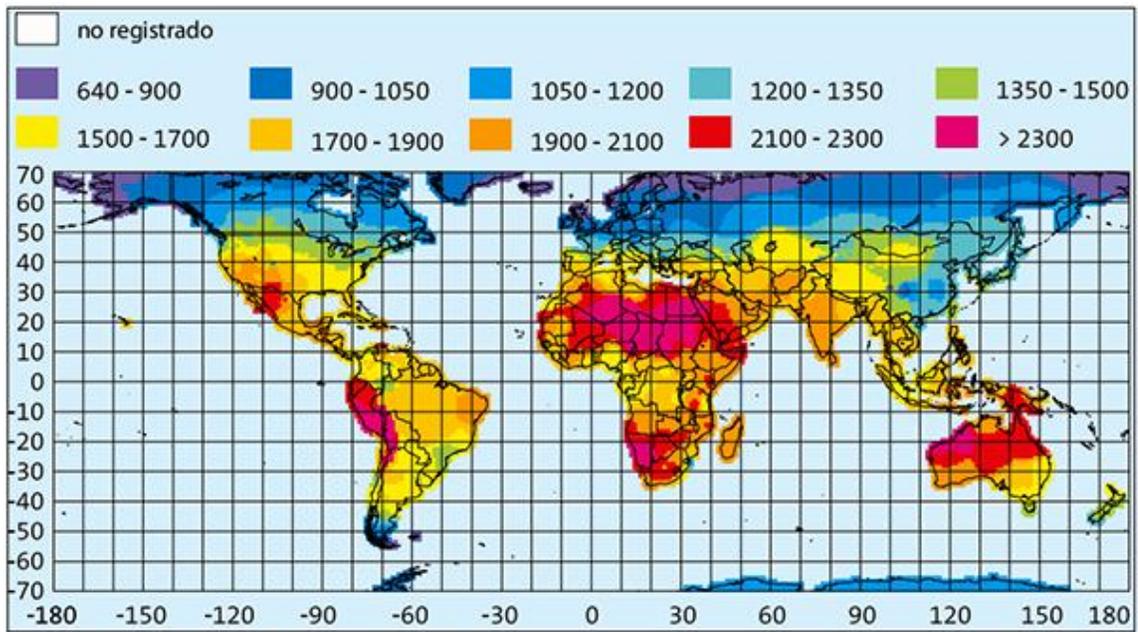


Figura 1.2 Distribución mundial de la irradiación solar anual (kWh/m<sup>2</sup>).

El desconocimiento de los valores de irradiación solar de la localidad exacta en donde se implementaran las tecnologías solares puede conducir a limitaciones en cuanto al dimensionamiento de los equipos de aprovechamiento de la radiación solar. Esta insuficiencia en los diseños puede tener graves consecuencias en lo que respecta a costos de inversión, operación o mantenimiento, así como la sostenibilidad de los sistemas cuando ellos no cumplen con el fin para el cual fueron instalados.

La energía solar puede ser aprovechada de diversas formas y con diferentes tecnologías. La conversión de esta energía puede ser natural o tecnológica. La natural por ejemplo es la que se produce en las plantas donde las mismas toman la energía del Sol para su desarrollo. En el caso de la conversión tecnológica la misma puede utilizarse para producir energía térmica o energía eléctrica. En especial la energía eléctrica obtenida mediante celdas fotovoltaicas, va sufriendo cambios sustanciales, fundamentalmente en la

mejora continua de la eficiencia mediante la implementación de investigaciones referidas a los materiales fotosensibles. En la figura 1.3 se presenta en forma de esquema una estructuración de la conversión de la energía solar.

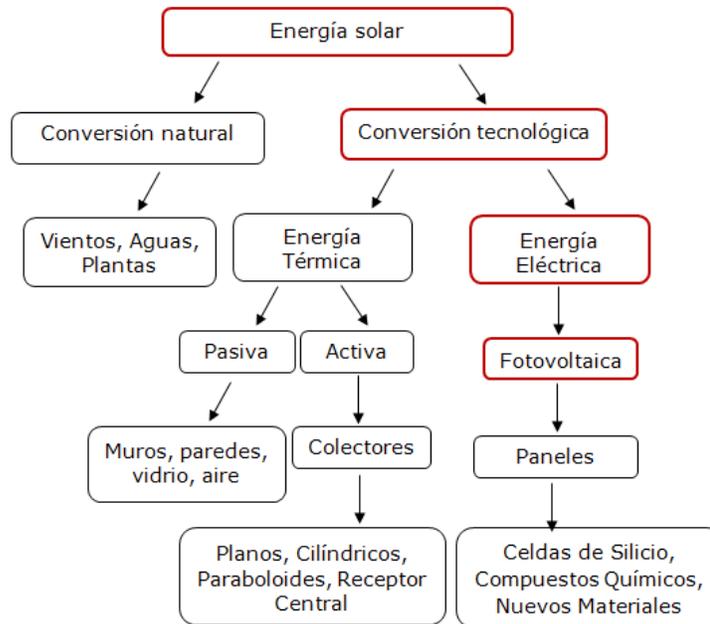


Figura 1.3. Esquema general del aprovechamiento de la energía solar.

Disimiles son los materiales para aplicaciones fotovoltaicas como se puede apreciar en la figura 1.4. La tecnología más difundida es aquella que tiene como compuesto fundamental el Silicio Amorfo.

Dentro de las características fundamentales de las tecnologías FV se destaca:

- La simplicidad de la instalación.
- Elevada confiabilidad.
- Bajo mantenimiento.
- Ausencia de costo de combustible.
- Ausencia de ruido.
- Vida útil muy prolongada.
- Disminución progresiva de los costos.
- Incremento de su eficiencia en la conversión de energía.

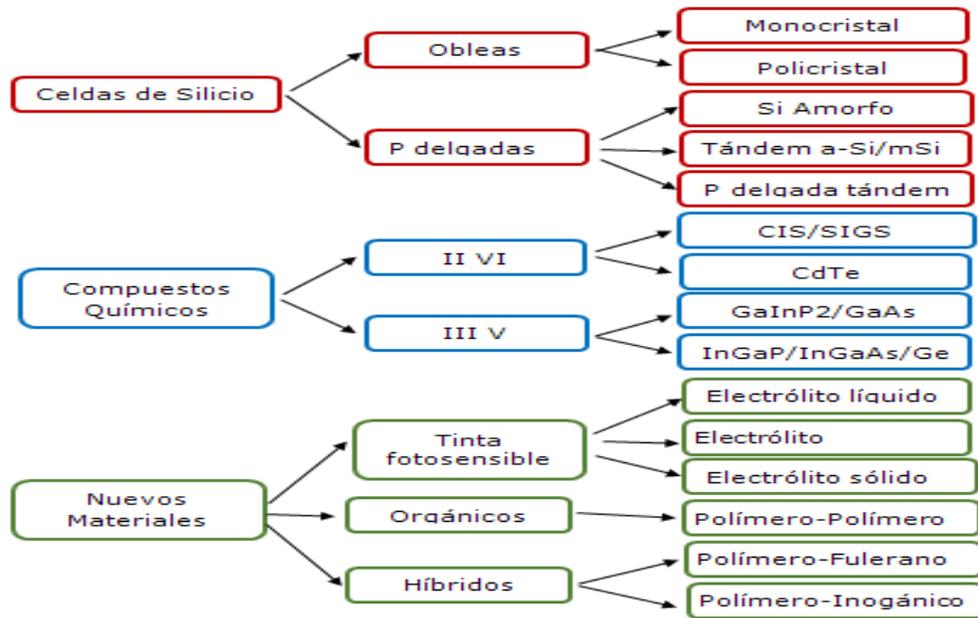


Figura 1.4. Esquema de los principales materiales empleados en las celdas FV.

### 1.3.1 Conceptos y terminologías de la energía fotovoltaica

Entre las diferentes manifestaciones de la energía solar, la **energía fotovoltaica** aprovecha directamente la radiación solar para generar energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. La energía fotovoltaica aprovecha la energía de los fotones de la radiación solar. El fotón al chocar con un metal libera electrones, los cuales generan corriente eléctrica. La cantidad de electrones liberados depende directamente de la frecuencia de onda de los mismos. A mayor frecuencia, mayor energía liberada, por tanto mayor cantidad de electrones. Si se cuenta con una gran cantidad de fotones se obtiene una cantidad de electrones suficientes para generar energía eléctrica de forma continua.

Tradicionalmente la energía fotovoltaica se utilizaba para el suministro de energía eléctrica en lugares donde no era rentable la instalación de líneas eléctricas. Con el tiempo su uso se ha ido diversificando hasta el punto que actualmente resultan de gran interés las instalaciones solares en conexión con la red eléctrica. La energía fotovoltaica tiene muchísimas aplicaciones, en sectores como las telecomunicaciones, automoción, náuticos, parquímetros.

También podemos encontrar instalaciones fotovoltaicas en lugares como carreteras, ferrocarriles, plataformas petrolíferas o incluso en puentes, gaseoductos y oleoductos.

Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas. Los paneles captan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua, que se almacena en acumuladores, para que pueda ser utilizada fuera de las horas de luz.

La **radiación solar** está formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Algunas de ellas, las de longitud de onda comprendida entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$ , pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que se conoce como luz visible. Otras ondas electromagnéticas, aunque no visibles, hacen notar sus efectos, al ceder a los cuerpos la energía que transportan.

La radiación que llega a la superficie terrestre no es constante, sino que varía de forma aleatoria debido a muy diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre. Una gran parte de la radiación es absorbida o dispersada en la atmósfera como consecuencia de su propia estructura y de los agentes variables que allí se encuentran, como la polución y la nubosidad (Hans 1994).

En la superficie terrestre se puede descomponer la radiación solar en tres tipos como muestra la figura 1.5 y que depende muy directamente de la naturaleza del suelo formas. La radiación solar puede descomponerse de las siguientes formas:

- Radiación solar directa: es aquella que se recibe del Sol sin haber sufrido ningún cambio de dirección por reflexión o difusión.
- Radiación solar difusa: es la que se recibe del Sol después de haber sufrido cambios de dirección al atravesar la atmosfera.
- Radiación reflejada o de albedo: procede del suelo, debida a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre él.



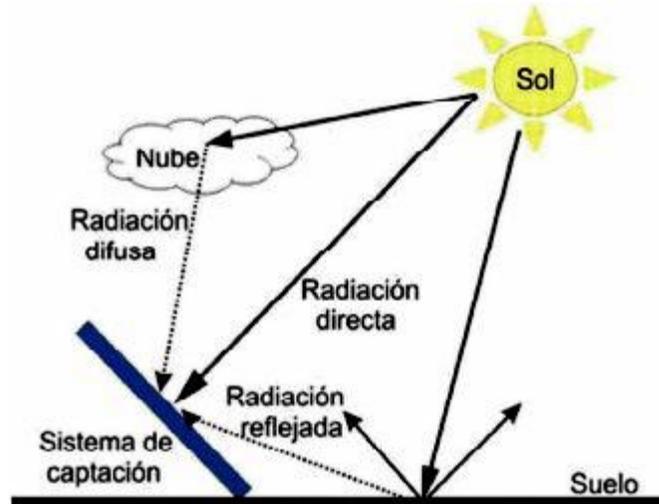


Figura 1.5. Esquema de irradiación solar incidente sobre la tierra

Los módulos fotovoltaicos admiten tanto radiación directa como difusa, pudiendo generar energía eléctrica incluso en días nublados.

Otros conceptos definiciones sobre la energía solar y fotovoltaica pueden encontrarse en el *Diccionario Español de la Energía* (R.A.C.E.F.N. & R.A.I. 2004) en cual aparecen de forma paralela las terminologías en idioma inglés.

Generalmente los sistemas fotovoltaicos se emplean en aquellos lugares, donde no se tiene acceso la red eléctrica y resulta más económico instalarlos, que la extensión de la misma, pero también se podría tener sistemas dentro de la ciudad o interconectados a la red eléctrica. Tiene tantas aplicaciones como pueda tener la electricidad. La única limitación existente es el coste del equipo o el tamaño del campo de paneles.

La energía solar fotovoltaica es, al igual que el resto de energías renovables, inagotable, limpia, respetable con el medio ambiente y sentando las bases de una autoabastecimiento. Al igual que el resto de las energías limpias, contribuye a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y especialmente de CO<sub>2</sub>, ayudando a cumplir los compromisos adquiridos por el Protocolo de Kioto y a proteger nuestro planeta del cambio climático.

### 1.3.2 Componentes de los sistemas fotovoltaicos autónomos

Generalmente los sistemas fotovoltaicos se emplean en aquellos lugares, donde no se tiene acceso a la red eléctrica y resulta más económico instalarlos, que la extensión de la misma, pero también se podría tener sistemas dentro de la ciudad o interconectados a la red eléctrica.

Un Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFVA) o aislado de la red, es un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que son utilizados para transformar la energía solar disponible en energía eléctrica, por medio de una celda fotovoltaica. Este sistema es autónomo y de poca potencia, destinado a cubrir necesidades básicas de electrificación rural o de zonas aisladas, sistemas de bombeo, alumbrado público, señalización, telecomunicaciones, telemetría, espacial y satelital, entre otras.

En el trabajo de (Aguilera & Hontoria 2012) se detallan los componentes de un SFVA está compuesto por los siguientes elementos: sistema de generación, sistema de acumulación, sistema de regulación y el sistema de adaptación de corriente según se puede apreciar en la figura 1.6.

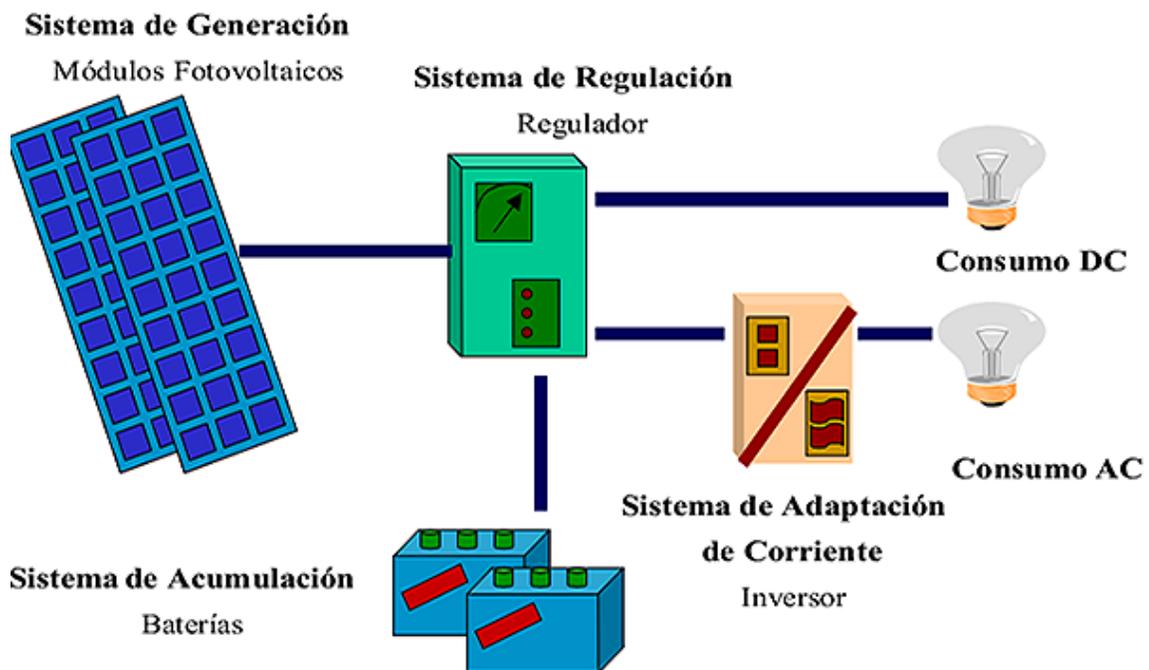


Figura 1.6 Componentes de un Sistema Fotovoltaico Autónomo.

El **sistema de generación** se define como el conjunto de los módulos compuestos por células fotovoltaicas que componen el sistema. Son los encargados de convertir la radiación solar incidente en energía eléctrica debido a procesos de origen eléctrico generados en el seno de cada una de las células que lo constituyen. El sistema de generación está formado por conjuntos de módulos fotovoltaicos, utilizados para transformar la energía solar disponible en energía eléctrica, conectados en arreglos en serie y/o paralelo, con la combinación adecuada para obtener la corriente y el voltaje necesarios para una determinada aplicación.

Por su parte el **sistema de regulación** es un dispositivo que tiene como función: evitar las situaciones de sobrecarga y sobredescarga para preservar la vida de la batería (Egido 2010) y actúa sobre las líneas de generación y consumo según la tensión de la batería o su estado de carga. Esto hace que, para poderlo dimensionar tengamos que tener principalmente en cuenta la corriente que deberá soportar, para no ver afectado su rendimiento.

El **sistema de acumulación** no es más que las baterías, las cuales son cargadas por el sistema generador. Durante momentos de menor consumo, almacenan la energía mediante procesos químicos y pueden descargarla cuando sea preciso convirtiéndola otra vez en energía eléctrica disponible para su consumo. Se trata de un elemento fundamental en una instalación aislada ya que tiene como principal misión la de aportar energía en los momentos en los que el generador no aporta suficiente electricidad.

La participación del sistema de acumulación en los sistemas solares es clave, aportando energía eléctrica durante la noche o momentos de interrupción en la generación de los paneles. Otra de sus principales virtudes es la de capacitar al sistema para afrontar momentos de necesidades de potencia mayor a la producida por los módulos. Asimismo, otra de las grandes ventajas que le otorga al sistema es posibilitar su autonomía, permitiendo que siga administrando energía a pesar de no estarla generando durante algún tiempo.

El inversor o **sistema de adaptación de corriente** es el encargado de convertir la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos en alterna, para así poder utilizarla con los dispositivos que se tengan instalados, adaptando la potencia a la requerida.

Finalmente, de la curva de demanda de la carga dependerá toda la dinámica de trabajo del sistema, por tanto los cálculos del dimensionado deben realizarse de la forma más adecuada posible para lograr la autonomía del sistema.

#### **1.4 Energía fotovoltaica en el contexto de Argelia**

Argelia es un país en desarrollo que con la explotación petrolera empezó la modernización de su economía, moviéndose hacia un mayor crecimiento económico y consumo energético. Como resultado de ello, ha tenido una demanda de energía creciente y una modernización de su matriz energética que constituyó a los combustibles fósiles en la fuente principal de energía para el país. Así, en el 2008, el petróleo representaba el 90% de la matriz energética en el país, Argelia en este contexto exportará 10 GW para el continente Europeo, desde el comienzo de este año, ya se incorporó al país Africano la compañía China (Yingli) la mayor fotovoltaica de mundo, china instaló un proyecto de 233 MW en el territorio Argelino, así para satisfacer la matriz energética del país norafricano mediante el uso de este tipo de tecnología solar fotovoltaica (Universitaires 1988).

##### **1.4.1 Características geográficas y sociales de Tindouf para la electrificación con energía fotovoltaica**

La provincia de Tindouf mostrada en la figura 1.7, se encuentra en el oeste de Argelia entre los 27°40' N y los 8°09' W, y su capital tiene una población de 44.058 habitantes. Cercano a la capital se ubican los campamentos de refugiados del Sahara Occidental destacándose la presencia de 200 000 personas.





Figura 1.7 Localización geográfica de Tindouf (Es.Db-City.Com 2014).

En Tindouf hay un clima árido o xerotérmico, es una expresión utilizada para designar el clima de una región del planeta donde las lluvias anuales son menores a los 200 mm. Las escasas precipitaciones están por debajo de la evapotranspiración. Las escasas precipitaciones se deben a distintas causas, como la disposición del relieve o la presencia de corrientes marinas frías que condensan la humedad y dan origen a desiertos costeros.

En Tindouf el clima es muy caluroso con veranos húmedos, tormentas desérticas intensas. Desde el comienzo del Solsticio de verano la población vive a temperaturas extremas desde la década de la antigüedad la población se dedica al ganado de camellos y ovejas. Esta zona se encuentra dentro del gigantesco desierto del Sahara.

En Tindouf se destacan las poblaciones nómadas alejadas de los centros urbanos y de las redes del sistema eléctrico nacional. Estas poblaciones con eminentes necesidades energéticas pueden formar parte de políticas de

electrificación debido a determinadas facilidades de financiamiento por parte de estas poblaciones.

La gran mayoría de los pobladores (más del 90 %) viven viviendas tradicionales denominadas Jaima. La Jaima es una tienda de grandes proporciones, donde el suelo está cubierto con alfombras y mantas (Saharai 2014). En la figura 1.8 se puede apreciar cómo la Jaima está integrada a otras habitaciones conformadas por ladrillos de adobe y techos horizontales con dimensiones adecuadas para la instalación de paneles fotovoltaicos.

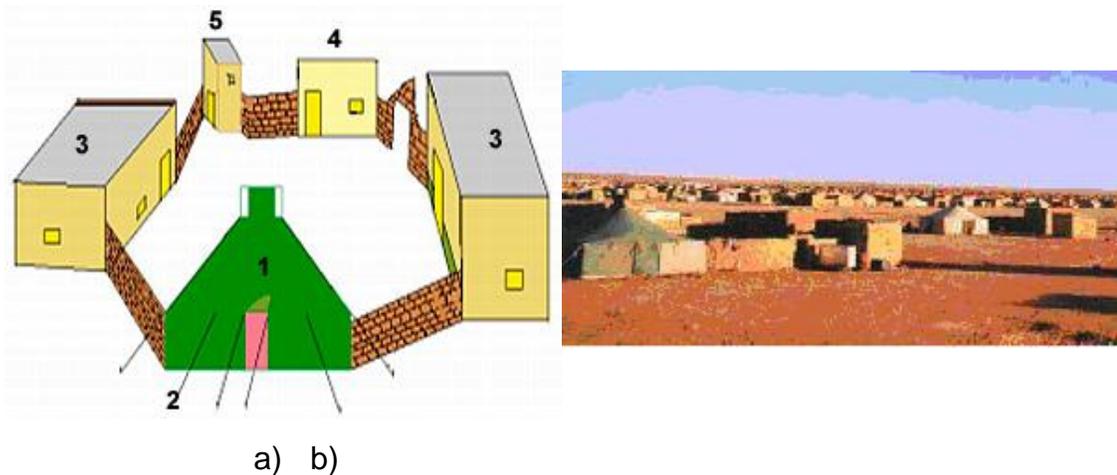


Figura 1.8 Jaima: a) Estructura, b) Vista de una comunidad.

En la figura anterior:

1. Jaima de lona
2. Sogas para sujetarla
3. Cuartos grande de adobe
4. Cocina
5. Baño

## **CAPÍTULO II. Materiales y métodos**

### **2.1 Introducción**

Tindouf tiene un clima caliente del desierto, con veranos muy calurosos e inviernos suaves. Para asegurar el funcionamiento óptimo y eficiente de todo el sistema fotovoltaico, se impone la necesidad de operar continuamente los módulos en el punto de máxima potencia ( $P_{MPP}$ ) independientemente de los factores climáticos y de la carga. La máxima potencia producida por una celda solar depende de su temperatura y de la radiación solar absorbida, los cuales representan factores climáticos impredecibles (Molina *et al.* 2007). En este capítulo se realiza el dimensionado de los módulos fotovoltaicos acorde a las características de las Jaimas de la zona desértica de Tindouf, se realiza además, un análisis de la influencia de la temperatura de trabajo en el rendimiento de un panel fotovoltaico y la descripción de las facilidades de una herramienta que permite determinar teóricamente los diferentes parámetros de operación de los paneles fotovoltaicos.

### **2.2 Métodos de dimensionado**

Existen gran variedad de métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos abordados en diferentes trabajos e investigaciones de diversos autores a lo largo de varios años, entre estos se puede destacar a (Chapman 1987; Egidio & Lorenzo 1992; Sidrach-De-Cardona & López 1998; Sidrach-De-Cardona & López 1999; Molina *et al.* 2007; Gavilán 2011; Aguilera & Hontoria 2012; Aguilera & Hontoria 2013; Lorenzo 2013; Europe Sun Fields 2014). 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 realizarse.

El dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo debe hacerse atendiendo a la fiabilidad del sistema, entendiendo por fiabilidad el asegurar el buen funcionamiento del mismo, de forma tal que la probabilidad de fallo sea lo más baja posible, dentro de unos márgenes que se establecen según el tipo de sistema.

Según (Aguilera & Hontoria 2013) existen dos formas de realizar el dimensionado de sistemas fotovoltaicos:

- Manual: No es muy efectivo pero válido para hacer estimaciones.
- Software de dimensionado: Existen muchos programas más o menos complicados. Tienen la ventaja de que suelen emplear métodos estadísticos para calcular la probabilidad de fallo y el estado de carga de la batería. Algunos programas de dimensionado son:
  1. NSol
  2. PVSol
  3. Winsize
  4. RETScreen

Los autores (Aguilera & Hontoria 2012) presentan un método manual que es comprensible por su sencillez y a la vez, sirve como primera aproximación en el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico. Por este motivo, el trabajo desarrollado en esta investigación se basa en este método, a continuación se describe los pasos a seguir.

### **2.3 Método propuesto para el dimensionado de SFVA.**

El método de dimensionado de sistemas fotovoltaicos desarrollado por (Aguilera & Hontoria 2012) es muy sencillo, pero a pesar de su sencillez proporciona muy buenos resultados 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

### **Paso 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.

Mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2 se calcula la energía consumida por los equipos conectados al sistema fotovoltaico.

$$E_{AC} = \sum P_{AC(i)} \cdot t_{di} \quad (2.1)$$

$$E_{DC} = \sum P_{DC(i)} \cdot t_{di} \quad (2.2)$$

Donde

$E_{AC}$ : 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 debe tener en cuenta los rendimientos de las etapas existentes como se muestra en la ecuación 2.3.



$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{Bat}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{Bat} \cdot \eta_{Inv}} \quad (2.3)$$

Donde:

$E_T$ : Energía real requerida por el sistema (Wh)

$\eta_{Bat}$ : Rendimiento de la batería

$\eta_{Inv}$ : Rendimiento del inversor

La energía real requerida  $E_T$ , 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.

## **Paso 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. En este paso se siguió la metodología abordada por (Lorenzo 2013) en una investigación aplicada a la zona de Madrid, España.

El autor explica de forma concisa, que la estimación comporta tres pasos:

### **1. La predicción de la irradiación anual incidente sobre una superficie horizontal, $G_a(0)$ .**

Se hace por el sencillo procedimiento de suponer que coincide con el valor medio medido en el pasado, a lo largo de un número suficiente de años. Son diversas las entidades u organismos que miden la radiación solar y publican los resultados, en forma de atlas o bases de datos que contienen un valor para cada mes del año. Como no podía ser de otra manera, diversos organismos significan diversos procedimientos y diversos resultados, que llegan a ser muy diferentes para algunos meses del año. Afortunadamente, la situación es

bastante confortable cuando se trata de valores anuales, ya que las diferencias entre unas fuentes de información y otras no son muy grande. En realidad, la natural variabilidad e impredecibilidad del clima hace que, en términos estadísticos, no pueda decirse que una fuente de información sea mejor que otra (Lorenzo 2013).

## **2. La estimación de la irradiación anual incidente sobre una superficie inclinada de tal manera que maximice la captación de la radiación solar $G_a(\beta_{opt})$ .**

El cálculo de irradiaciones sobre superficies inclinadas, a partir de datos sobre superficie horizontal, es objeto de permanente revisión en el ámbito de los estudiosos de la radiación solar, siendo además varias las aplicaciones informáticas disponibles para llevarlo a cabo. La inclinación de la superficie óptima ( $\beta_{opt}$ ) que, por otro lado, está orientada al Sur, se relaciona con la latitud N mediante la ecuación 2.4 (Lorenzo 2013).

$$(\beta_{opt}) = 3,7 + 0,69 \cdot \varnothing \quad (2.4)$$

Donde

$\beta_{opt}$ : Ángulo óptimo de inclinación de los paneles solares

$\varnothing$ : Latitud del lugar de emplazamiento de los paneles solares

En esta expresión ambos ángulos se expresan en grados. La irradiación anual sobre esta superficie óptima se estima mediante la ecuación 2.5 (Lorenzo 2013).

$$G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1 - 4,446 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2} \quad (2.5)$$

### **Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico**



En este punto se aplica el método de dimensionado del *Mes Crítico* o *Mes Desfavorable* (Aguilera & Hontoria 2012).

Conocido del apartado anterior los consumos mensuales ET 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.

Se debe señalar que para realizar los cálculos en este punto, se considera que el consumo Et es el mismo para todos los días del mes y del año, pero como la radiación sí varía durante el mes, entonces se encuentra la relación Consumo/Radiación mayor para el ángulo óptimo de inclinación.

Este criterio de dimensionado 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.

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 ecuación 2.6.

$$N_T = \frac{E_T}{P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G} \quad (2.6)$$

Donde

$N_T$ : Número total de módulos

$E_T$ : Energía real requerida (Wh)

$P_p$ : Potencia Pico del Módulo ( $W/m^2$ )

$G_{m\beta}$ : Radiación Global sobre una superficie inclinada un ángulo  $\beta$  ( $kW/m^2$ )

$P_G$ : 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 el número de módulos en serie y en paralelo. El número de módulos que habrá que conectar en serie, se calcula según la ecuación 2.7.

$$N_s = \frac{V_{Bat}}{V_m} \quad (2.7)$$

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)

El número de ramas en paralelo a conectar para suministra la potencia necesaria, viene dado por la ecuación 8.

$$N_p = \frac{N_T}{N_s} \quad (2.8)$$

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

Los valores de  $N_T$ ,  $N$  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  $\beta$  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.

#### Paso 4. Dimensionado del sistema de acumulación

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 2.9 y 2.10 se utilizan para hallar la capacidad de la misma, tanto en Wh (vatios hora) como en Ah (amperios hora): (Aguilera & Hontoria 2012)

$$C_n(\text{Wh}) = E_T \cdot \frac{N}{P_d} \quad (2.9)$$

$$C_n(\text{Ah}) = \frac{C_n(\text{Ah})}{V_{\text{Bat}}} \quad (2.10)$$

Donde:

$C_n$ : Capacidad nominal de la batería (Wh ó Ah)

$E_T$ : Energía real requerida (Wh)

$P_d$ : Máxima Profundidad de descarga de la batería

$V_{\text{Bat}}$ : 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.

### **Paso 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 los generadores la suma de las intensidades que producen los módulos funcionando a pleno rendimiento y se calcula según la ecuación 2.11.

$$I_G = I_R \cdot N_R \quad (2.11)$$

Donde

$I_G$ : Corriente producida por el generador (A)

$N_R$ : Número de ramas en paralelo del generador

El término  $I_R$  se calcula según la ecuación 2.12.

$$I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m \quad (2.12)$$



Donde

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

$P_p$ : Potencia Pico del módulo fotovoltaico ( $W/m^2$ )

$\eta_m$ : 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, se calcula según la ecuación 2.13.

$$I_C = \frac{P_{DC}}{V_{Bat}} + \frac{P_{AC}}{220} \quad (2.13)$$

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.

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

Donde:

$I_R$ : Corriente que soportará el regulador (A)

### **Paso 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 mediante la expresión 2.14.

$$P_{inv} \approx P_{AC} \quad (2.14)$$

### **Paso 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 mediante la ecuación 2.15.

$$P_{PC} = I^2 \cdot R_C \quad (2.15)$$

Siendo:

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

I: Corriente que circula por los conductores (A)

El término  $R_C$  se calcula según la ecuación 16.

$$R_C = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (2.16)$$

$R_C$ : Resistencia óhmica de los conductores ( $\Omega$ )

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

L: Longitud de los conductores (m)

S: Sección de los conductores ( $\text{mm}^2$ )

## **2.4 Factores que afectan a la característica I-V del panel fotovoltaico**

La curva característica I-V del panel fotovoltaico se ve afectada por factores ambientales tales como la intensidad de iluminación o Irradiancia (G), la temperatura (T) y la distribución espectral de la luz solar (Gavilán 2011). Como se pudo apreciar en el capítulo 1, los valores de irradiación para la región de Tindouf se mantienen con valores elevados durante todo el año, esto es favorable a la hora de operar los módulos fotovoltaicos. Sin embargo se alcanzan valores extremos de temperatura que van desde los 5 °C en el mes de enero hasta los 44 °C en el mes de julio (N.A.S.A. 2014), por este motivo es muy importante analizar los factores que afectan la generación de energía de los paneles.

### **2.4.1 Efecto de la intensidad de iluminación (Irradiancia)**

El efecto de la irradiancia fue descrito muy bien por (Gavilán 2011), donde plantea que la irradiancia afecta principalmente a la corriente, de forma que se puede considerar que la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico es

proporcional a la irradiancia tal y como lo muestra la ecuación 17.

$$I_{SC}(G_2) = I_{SC}(G_1) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (2.17)$$

En esta expresión,  $I_{SC}(G_2)$  es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia  $G_2$  e  $I_{SC}(G_1)$  es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia  $G_1$ .

La ecuación 2.17 es válida para variaciones de irradiancia a temperatura constante, y resulta una aproximación cuando ésta varía, ya que supone despreciar los efectos que la temperatura tiene sobre la corriente de cortocircuito. Sin embargo, puede considerarse una expresión adecuada para un cálculo aproximado de los valores de  $I_{SC}$  a diferentes valores de irradiancia, ya que el error que se comete es inferior al 0,5%.

La figura 2.1 muestra un ejemplo de la influencia de la intensidad de iluminación sobre una curva I-V para el módulo MSX-60 (Solarex 1998) a distintos niveles de irradiancia y temperatura constante (50° C).

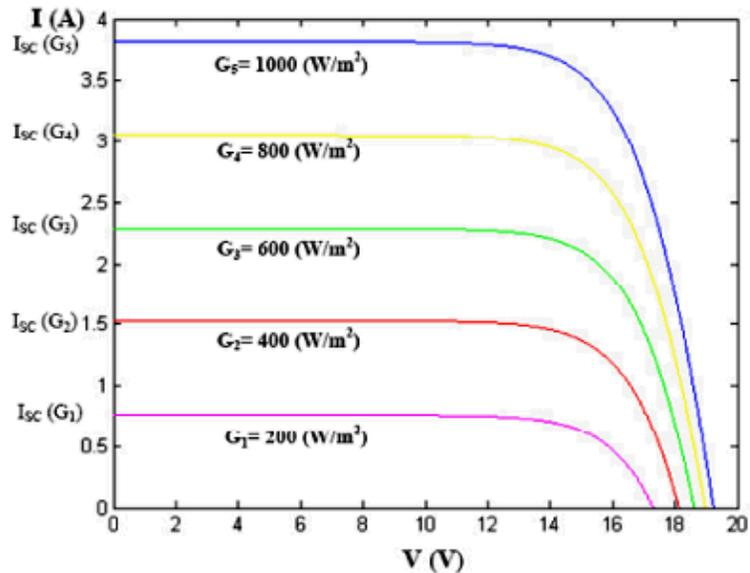


Figura 2.1 Efecto de la irradiancia sobre la característica I-V de un panel FV.

#### 2.4.2 Efecto de la temperatura

La temperatura afecta principalmente a los valores de voltaje de la característica I-V y tiene su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto

( $V_{OC}$ ), aunque también modifica los valores del punto de máxima potencia y el valor de  $I_{SC}$  (éste muy ligeramente). En la figura 2.2 puede observarse un ejemplo de la variación de la curva característica I-V para el módulo MSX-60 (Solarex 1998) al variar la temperatura, manteniendo la irradiancia constante.

Existen tres coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  que representan la variación de los parámetros fundamentales de la característica I-V del generador fotovoltaico con la temperatura. Así,  $\alpha$  expresa la variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura,  $\beta$  la variación del voltaje de circuito abierto y  $\gamma$  la variación del punto de máxima potencia  $P_{MPP}$ .

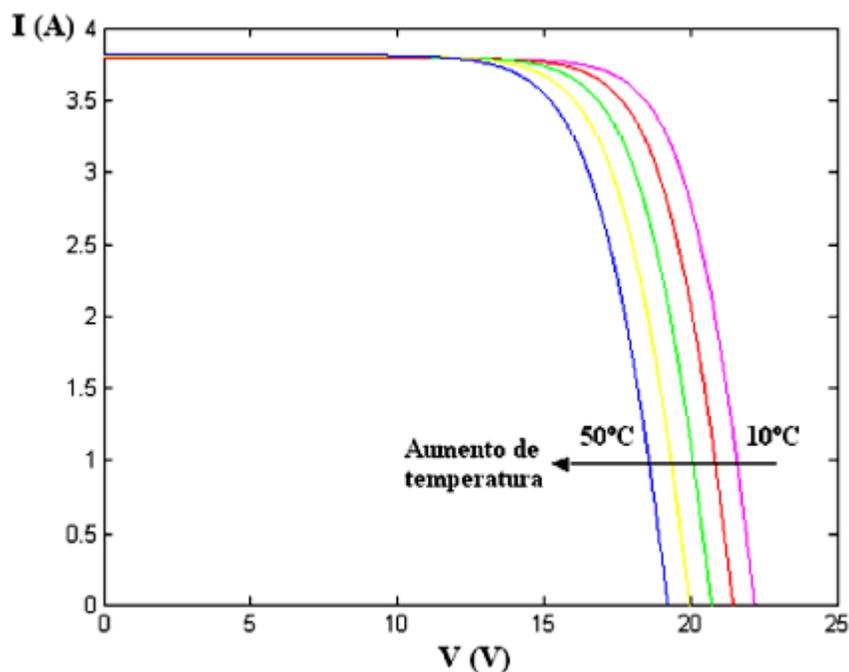


Figura 2.2 Ejemplo de variación de la característica I-V de un panel fotovoltaico al variar la temperatura, manteniendo la irradiancia ( $G$ ) constante ( $1000 \text{ W/m}^2$ ).

En general los fabricantes de módulos o paneles fotovoltaicos incluyen en sus hojas de características técnicas los valores de estos tres coeficientes, cuyos valores más comunes pueden calcularse según las ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20.

$$\alpha = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T} \approx -0,04\% \quad (2.18)$$

$$\beta = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T} \approx -0,037\% \quad (2.19)$$

$$\gamma = \frac{\partial P_{MPP}}{\partial T} \approx -0,44\% \quad (2.20)$$

Los valores presentados en las ecuaciones (2.18), (2.19) y (2.20) son valores típicos para dispositivos de silicio monocristalino expresados en porcentaje, sin embargo es más común encontrarse estos valores como referencia a los de una célula constituyente del módulo fotovoltaico con valores típicos. Para el caso de una célula de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup> estos valores varían según se muestra en las ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23.

$$\alpha \approx -1,5 \text{ mA}/^{\circ}\text{C} \quad (2.21)$$

$$\beta \approx -2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{P_{MPP}} \cdot \gamma \approx -1,00441/^{\circ}\text{C} \quad (2.23)$$

## 2.5 Condiciones de referencia

Dado que la curva característica del módulo fotovoltaico cambia con las condiciones ambientales, es necesario definir una serie de condiciones de operación de referencia para poder contrastar y comparar los valores de distintos fabricantes. Estas condiciones de referencia pueden ser extrapoladas a otras diferentes. A continuación se explican cuáles son las más empleadas por los fabricantes.

### 2.5.1 Condiciones Estándares de Medida (STC)

Son las de uso más generalizado y universal, y están definidas por:

- Irradiancia 1000 W/m<sup>2</sup>
- Distribución espectral AM 1.5G
- Incidencia normal
- Temperatura de la célula 25 °C

Normalmente los parámetros característicos de los módulos o células incluidos en las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes vienen definidos en estas condiciones. Sin embargo la experiencia muestra que pocas veces los módulos fotovoltaicos trabajan en estas condiciones, ya que con un nivel de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  que puede alcanzarse al mediodía, los módulos adquieren temperaturas de más de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , a no ser que sea un día claro de invierno. Por esta razón se definen además de las anteriores, las condiciones nominales de operación (CNO), las cuales pretenden representar el comportamiento del módulo de manera más realista.

### 2.5.2 Condiciones Nominales de Operación (CNO)

- Irradiancia  $800 \text{ W/m}^2$
- Temperatura  $T^a$  de operación nominal de la Célula (TONC)
- Velocidad del viento  $1 \text{ m/s}$
- Temperatura Ambiente  $20^\circ \text{C}$

TONC se define como la temperatura nominal de operación de la célula, y representa la temperatura que alcanzarían las células solares para un nivel de irradiancia de  $800 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , velocidad del viento de  $1 \text{ m/s}$  e incidencia normal. El valor de TONC también viene incluido en las hojas de características técnicas de los módulos, y para un módulo de silicio monocristalino suele estar en torno a los  $47 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dado que las condiciones normales de operación hacen referencia a la temperatura ambiente, y no a la temperatura del módulo, es necesaria una expresión que relacione ambas. Se puede hacer una buena aproximación según lo muestra la ecuación 2.24.

$$T_C = T_a + \frac{T_{\text{ONC}} - 20}{800} \cdot G \quad (2.24)$$

Donde

$T_C$ : es la temperatura de la célula o módulo

$T_a$ : es la temperatura ambiente

TONC: es la Temperatura de Operación Nominal de la Célula G es la irradiancia ( $W/m^2$ )

## **2.6 Influencia de la temperatura de trabajo en el rendimiento de los módulos FV**

La temperatura de trabajo que alcanza un panel fotovoltaico obedece a una relación lineal dada por la ecuación 2.25.

$$T_t = T_a + k \cdot G \quad (2.25)$$

Donde

$T_t$ : es la temperatura de trabajo del panel

$T_a$ : es la máxima temperatura ambiente

G: es el valor de la irradiancia expresado en  $mW/cm^2$

k: es un coeficiente que varía entre 0,2 y 0,4  $^{\circ}C \text{ cm}^2/mW$ , dependiendo de la velocidad media del viento. Cuando ésta es muy baja, o inexistente, el enfriamiento del panel es pobre o nulo, y k toma valores cercanos o iguales al máximo (0,4).

Si la velocidad media del viento produce un enfriamiento efectivo del panel, el valor de k será el mínimo (0,2). El valor de G varía entre 80 y 100  $mW/cm^2$ . Para lugares con alto valor de irradiancia diaria se usa el valor máximo. Si existen nubes pasajeras que reducen el valor de irradiación, el valor de G se reduce a 80  $mW/cm^2$ .

El producto  $k \cdot G$  representa el incremento de temperatura que sufre el panel sobre la máxima temperatura ambiente.

El primer paso en el cálculo de la potencia de salida de un panel fotovoltaico trabajando a una temperatura mayor de la estándar a  $25^{\circ}C$ , es determinar los valores de radiación solar y temperatura ambiental para la zona en que éste vaya a ser usado.



Si se asumen como ejemplo las condiciones siguientes:

- Radiación solar:  $80 \text{ mW/cm}^2$ .
- Máxima temperatura de verano:  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Baja velocidad media del viento durante esa estación:  $k = 0,3$ .

Reemplazando estos valores en la expresión 2.25 se obtiene:

$$T_t = 30 + (0,3 \cdot 80) = 30 + 24 = 54^\circ\text{C} \quad (2.26)$$

Una vez conocido este valor, se determina el incremento en la temperatura de trabajo respecto a la de prueba estándar ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En el ejemplo este valor es de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La ecuación 2.27 proporciona el valor de la potencia de salida de un panel trabajando a una temperatura  $T_t$ .

$$P_t = P_p - (P_p \cdot d \cdot D_T) \quad (2.27)$$

Donde

$P_t$ : es la potencia de salida a la temperatura de trabajo  $T_t$

$P_p$ : es la potencia pico estándar del panel a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

$d$ : es el coeficiente de degradación ( $0,6\%/^\circ\text{C}$ )

$D_T$ : es el incremento de temperatura sobre la referencia de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Asumiendo que  $P_p = 60 \text{ W}$  y reemplazando los valores dados para cada una de las variables se obtiene el resultado reflejado en la ecuación 2.28.

$$P_t = 60 - (60 \cdot 0,006 \cdot 29) = 60 - 10,44 = 49,56 \text{ W} \quad (2.28)$$

Nótese la enorme influencia que tiene la temperatura de trabajo del panel en la potencia generada. Para este ejemplo se produce una pérdida de casi un 20%. Para temperaturas de trabajo aún más elevadas, como es común en las zonas desérticas, donde la radiación es alta y los vientos son inexistentes durante el verano, la pérdida de potencia es más acusada.



## **2.7 Herramienta informática para el dimensionado**

Para lograr mejor eficiencia y disminuir las probabilidades de error en los resultados, se decidió recoger en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel versión 2013, todos los datos y las ecuaciones mostradas en los epígrafes anteriores. Esta herramienta informática se programó de forma tal que se pueda realizar el dimensionado para cualquier lugar ubicado del planeta.

## **CAPÍTULO III. Análisis de los resultados**

### **3.1 Introducción**

Los resultados de los cálculos referidos a la metodología para el dimensionado de paneles fotovoltaicos, detallada en el apartado de materiales y métodos, se presentan en este capítulo. La metodología propuesta por Aguilera y Hontoria en el 2012, inicia con la sistematización de los parámetros climatológicos de la localidad donde se ubicaran los paneles. Las variables que fundamentalmente se analizan son la temperatura ambiente y los niveles de irradiación solar. Después de la determinación del dimensionado de los paneles, con una aplicación informática se realizan varias pruebas experimentales utilizando el modelo de generación de los dispositivos escogidos, lo cual permite conocer los principales parámetros operacionales bajo diferentes condiciones de explotación. El capítulo culmina con un análisis técnico económico referido a la implementación de los paneles solares fotovoltaicos en viviendas (Jaimas) características del oeste de Argelia (Tindouf).

### **3.2 Comportamiento de las variables climatológicas de Tindouf**

En el continente africano, el más necesitado en términos de alternativas energéticas, pues solo consume el 3 % de la energía a nivel mundial, se presentan escenarios adecuados para el empleo de la energía solar. En el gráfico de la figura 3.1 se puede apreciar un mapa de la radiación solar promedio anual, elaborado con los datos de (Solargis 2014) tomados desde el 2004 hasta el 2010. De forma particular en Argelia, un país de grandes dimensiones, existen diferentes zonas que se extienden de norte a sur, en ellas los niveles de irradiación solar anual abarcan valores desde 1600 hasta mayores de 2400 kWh/m<sup>2</sup> al año.

Global horizontal irradiation

Africa and Middle East

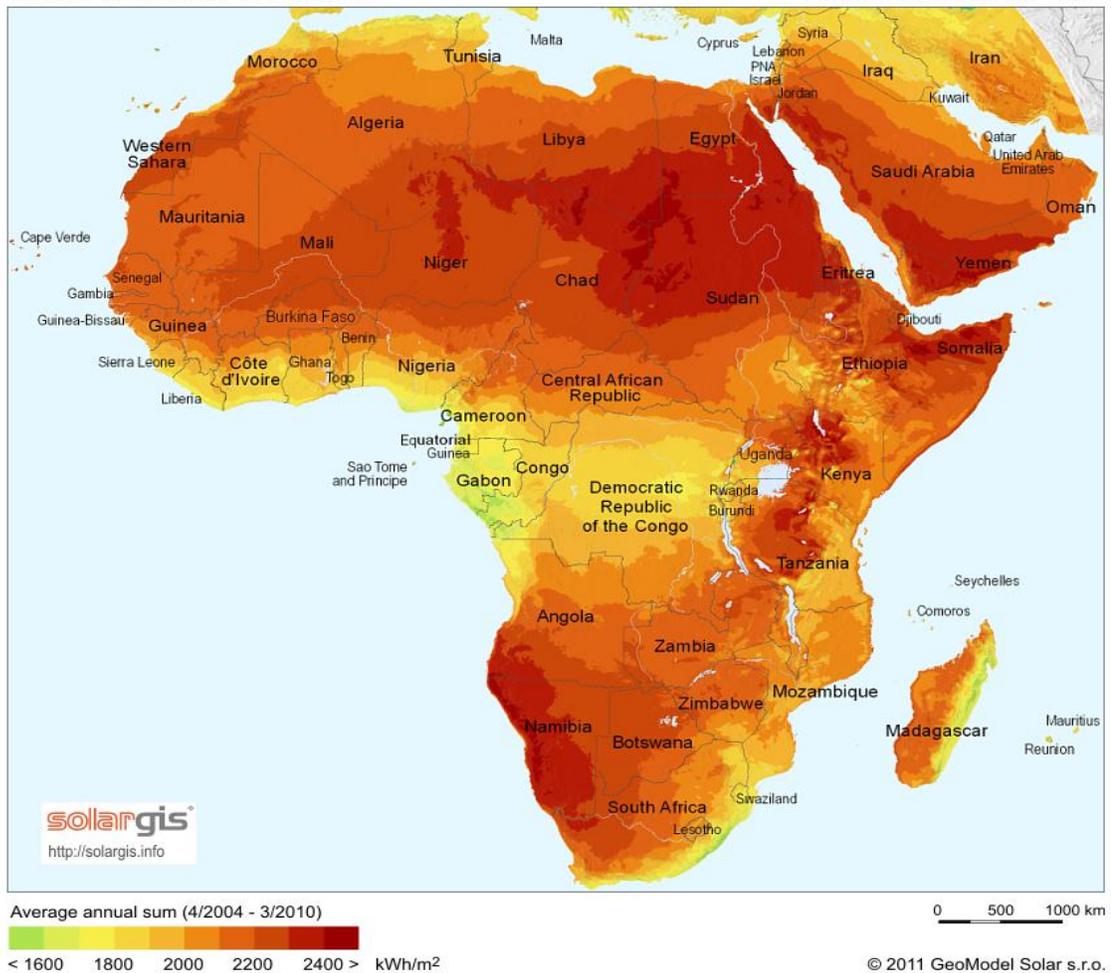


Figura 3.1 Niveles de irradiación promedio anual del continente africano.

A partir de los datos suministrados por la Agencia Americana Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés), se pudo obtener desde su página web (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/daily.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>), los valores de las principales variables climatológicas relacionadas con la energía solar y que favorecen al dimensionado de los paneles fotovoltaicos. La base de datos contiene valores desde 1985 hasta el 2005 en referencia a los siguientes variables:

- T10M: Temperatura del aire promedio a 10 m de altura (°C).
- T10MX: Temperatura del aire máxima a 10 m de altura (°C)
- clr\_dif: Irradiación promedio incidente sobre en una superficie horizontal

a cielo despejado ( $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ).

- swv\_dwn: Irradiación promedio incidente en una superficie horizontal ( $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ).
- clr\_sky: Irradiación promedio difusa a cielo despejado ( $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ).

Para obtener la información de las variables anteriores es necesaria la introducción en la aplicación de la página Web de la NASA (N.A.S.A. 2014), las coordenadas geográficas de las localidad del Tindouf correspondientes a los 27,75 grados de latitud y los -8,418056 de longitud.

La temperatura ambiente entre otros factores es el resultado de la irradiación solar incidente y en determinada medida determina la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos (ver epígrafe 2.6). Para que se tenga una idea del comportamiento promedio diario de la temperatura ambiente promedio y máxima durante un año, en la región analizada en la presente investigación, se presenta el gráfico de la figura 3.2.

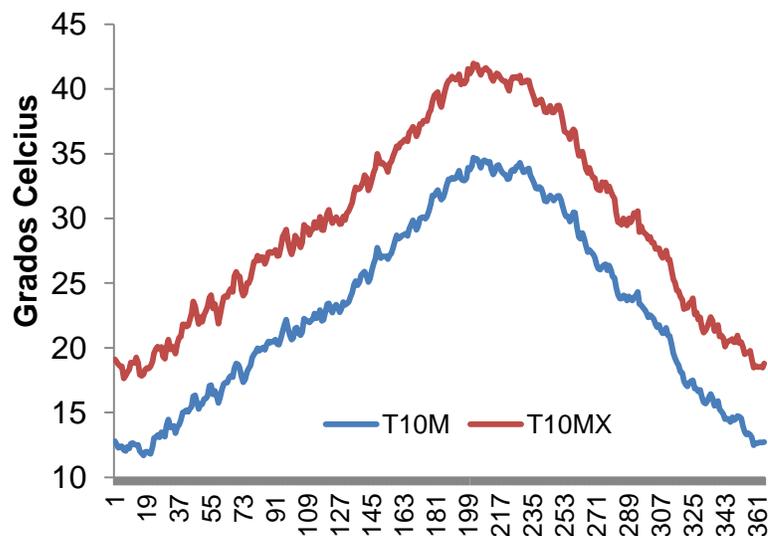


Figura 3.2 Comportamiento de la temperatura ambiente promedio.

Este comportamiento es representativo de un clima cálido y seco característico de los desiertos. Se puede apreciar que la temperatura ambiente promedio

oscila entre los 11 y 35 °C aunque para valores máximos de temperaturas diarias estos pueden oscilar entre 27 y 42 °C. La temperatura también va en continuo crecimiento hasta los meses de julio y agosto, descendiendo posteriormente hasta el mes de diciembre con similar pendiente. Al determinar una expresión matemática que caracterice la temperatura ambiente diría promedio, se tiene mediante regresión lineal con respecto al día del año, una expresión polinómica de sexto orden con un coeficiente de correlación de 0.993:

$$y = 1E-10x^5 - 1E-07x^4 + 3E-05x^3 - 0,0023x^2 + 0,1671x + 10,725 \quad (3.1)$$

En el caso de los niveles de irradiación solar tienen una tendencia similar al comportamiento de las temperatura ambiente. Los niveles de irradiación para el día oscilan entre 3 y 8 kWh/m<sup>2</sup>/día para todo un año, lo que evidencia las potencialidades para el uso de energía solar fotovoltaica. Estos valores de irradiación diaria sobre superficies horizontales indican que los niveles de radiación promedio horaria están entre valores de 300 y 800 W/m<sup>2</sup> considerando 10 horas luz solar. Estos valores se incrementan en aproximadamente un 6 % cuando los paneles solares fotovoltaicos se colocan de forma inclinada a partir de la determinación del ángulo de incidencia optimó.

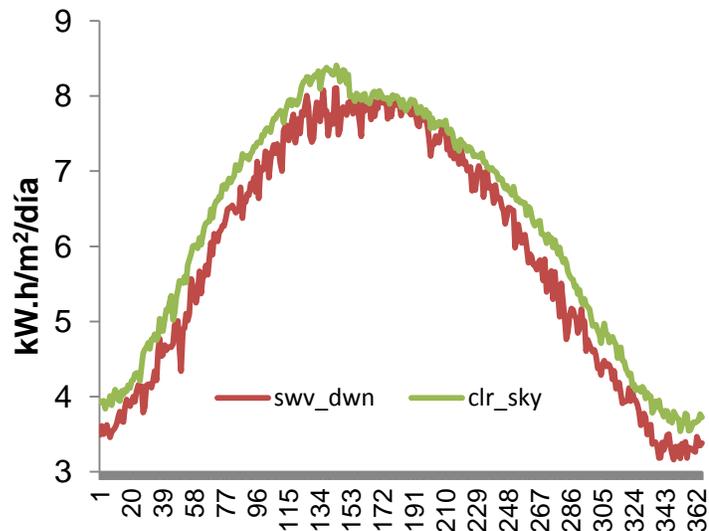


Figura 3.3 Irradiación promedio incidente en una superficie horizontal

La irradiación solar difusa es aquella que no llega directamente a un



determinado punto del planeta luego de ser dispersada por la atmósfera. En la figura 3.4 se puede apreciar el comportamiento anual de esta magnitud.

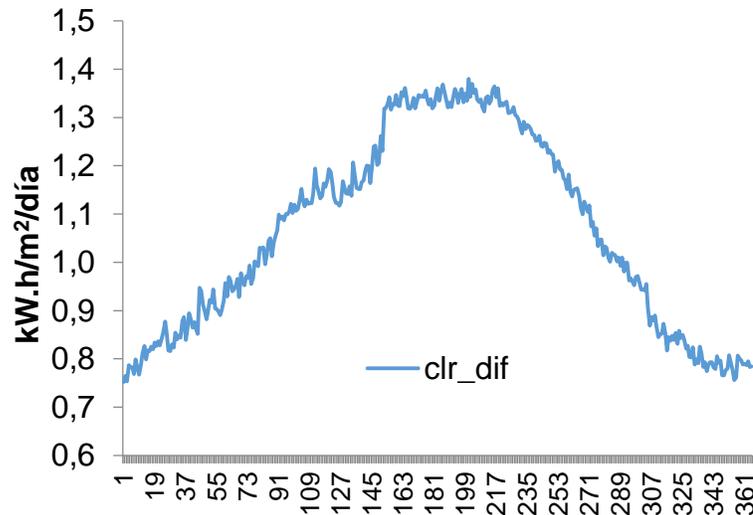


Figura 3.4 Comportamiento de la irradiación promedio difusa a cielo despejado.

Para resumir las magnitudes que reflejan el comportamiento de la temperatura ambiente y los niveles de irradiación de la localidad de Tindouf, coincidente con la forma de expresarlos en la literatura, se presenta la tabla 3.1 con los valores promedios mensuales.

Tabla 3.1 Comportamiento promedio mensual de algunas variables climatológicas de Tindouf.

Meses	T10M	T10MX	clr_dif	swv_dwn	clr_sky
	°C	°C	kWh/m <sup>2</sup> /día	kWh/m <sup>2</sup> /día	kWh/m <sup>2</sup> /día
Enero	12,59	18,89	0,81	3,81	4,17
Febrero	15,40	22,01	0,89	4,79	5,31
Marzo	18,71	25,52	0,99	6,18	6,69
Abril	21,70	28,67	1,13	7,20	7,62
Mayo	24,77	31,81	1,17	7,76	8,25
Junio	29,20	36,44	1,33	7,84	7,99
Julio	33,41	40,81	1,34	7,62	7,76
Agosto	33,25	40,16	1,30	6,96	7,21
Septiembre	29,39	35,80	1,17	6,01	6,49
Octubre	24,09	30,11	1,00	4,96	5,45
Noviembre	18,46	24,28	0,84	4,02	4,40
Diciembre	14,17	20,14	0,79	3,32	3,73

Se recuerda que estos valores corresponden al periodo de monitoreo desde el año 1985 hasta el 2005.

### **3.3 Equipamientos para SFVA disponibles en el mercado**

Luego de una revisión a varias empresas en internet con el fin de hacer la mejor elección entre calidad y precio de equipos a utilizar para el SFVA, en este trabajo se decidió optar por la oferta de la empresa SumSol. Las fichas técnicas de estos equipos, y también de los kits prediseñados, se pueden conseguir en la sección de “Descargas” de su página web: [www.sumSol.es](http://www.sumSol.es) .

SumSol Energía Solar se constituyó el 15 de enero del 2014 y está inscrita en el Registro Mercantil Madrid. Es una empresa dedicada a la fabricación propia o por terceros de baterías solares para uso Industrial, cargadores de pilas solares, celdas solares para producción de electricidad, baterías para uso doméstico, colectores solares y conjunto de paneles solares (Axesor 2014).

Basados en la experiencia de SumSol en este campo, en el dimensionado del SFVA desarrollado en este trabajo, se eligieron los componentes más fiables, buscando la mejor relación calidad-precio, siempre en base al principio de calidad y servicio.

A continuación se detallan las características de los equipos de SumSol propuestos en cada paso del dimensionado.

### **3.4 Determinación del consumo**

Para la determinación del consumo de las Jaimas de la zona desértica de Tindouf, se procedió a realizar un listado de los equipos más probables a usar por los habitantes de las Jaimas. En este paso se consideró que no existen equipos que funcionan con corriente continua (DC).

Sustituyendo los datos de la tabla 3.1 en la ecuación 2.1 se obtiene el consumo

promedio diario (ecuación 3.1), mensual (ecuación 3.2) y anual (ecuación 3.3) para una vivienda:

$$E_{AC} = 3514 \text{ Wh} \quad (3.1)$$

$$E_{AC} = 105,42 \text{ kWh} \quad (3.2)$$

$$E_{AC} = 1265,04 \text{ kWh} \quad (3.3)$$

Tabla 3.1 Potencia instalada y consumo de energía de una vivienda de Tindouf.

Equipos en Corriente Alterna (AC)				
Descripción del equipo	Potencia (W)	Cantidad Equipos	Horas/día funcionamiento	Consumo diario (Wh)
Lámpara Hab.1	18	1	5	90
Lámpara Hab.2	18	1	5	90
Lámpara Hab.3	18	1	5	90
Lámpara Cocina	18	1	11	198
Lámpara Comedor	18	1	5	90
Lámpara Sala	18	1	6	108
Lámpara Baño	18	1	5	90
Lavadora	90	1	0.9	81
Televisor	60	1	9	540
Radio	10	1	4	40
Refrigerador	90	1	15,3	1377
Teléfono	5	1	4	20
Ordenador	100	1	7	700

Una vez determinado el consumo de los equipos eléctricos, se procedió a calcular la energía real requerida por el sistema, para ello se sustituyó el valor de  $E_{AC}$  en la ecuación 2.3.

$$E_T = \frac{0}{\eta_{Bat}} + \frac{3514}{\eta_{Bat} \cdot \eta_{Inv}} = 0 + \frac{3514}{0,95 \cdot 0,9} = 4109,44 \text{ W} \quad (3.4)$$

Nótese que  $\eta_{Bat}=0.95$  y  $\eta_{Inv}=0.9$

La ecuación 3.4 demostró que en vez de necesitar 3514 Wh diario se precisan 4109,44 Wh.

En el anexo 3.1 se muestra una captura de las hojas de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### 3.5 Determinación del ángulo óptimo

En este paso se sustituyó la latitud (en grados) de Tindouf  $\varnothing = 27,74$  obtenida de (National Geospatial-Intelligence Agency 2014) en la ecuación 2.4 y se obtuvo un ángulo óptimo de inclinación de  $22,85^\circ$  para los módulos FV. Conocida la radiación incidente media mensual en superficie horizontal y siguiendo las ecuaciones del paso 2 del epígrafe 2.5 se puede calcular la radiación solar incidente para el ángulo óptimo. En la tabla 3.2 se muestran estos resultados.

Tabla 3.2 Irradiación incidente en Tindouf para distintas inclinaciones

Promedio 1985-2005	Radiación solar Global (kWh/m <sup>2</sup> )	
	0°	22,85°
Enero	3,807	4,104
Febrero	4,785	5,158
Marzo	6,178	6,659
Abril	7,197	7,758
Mayo	7,756	8,360
Junio	7,842	8,453
Julio	7,621	8,215
Agosto	6,961	7,504
Septiembre	6,014	6,482
Octubre	4,960	5,346
Noviembre	4,017	4,330
Diciembre	3,323	3,582

En el anexo 3.2 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### 3.6 Dimensionado de los módulos fotovoltaicos

Como se puede comprobar en la tabla 3.2, el mes más desfavorable o mes crítico es diciembre, por tal motivo se calculó el dimensionado de los módulos FV en base a este mes.

En este paso se empleó el módulo ISF-250 con una potencia de 250 Wp, las especificaciones técnicas se pueden ver en el anexo 3.5. La tabla 3.3 muestra las características técnicas de los módulos y los accesorios necesarios.

Tabla 3.3. Características del módulo FV seleccionado.

Componente	Modelo	Proveedor	Descripción
<p>Módulos FV</p> 	MM2503711	SumSol	Isototón ISF-250. 250Wp, 37,6 Vcc (Voc). Monocristalino
<p>Accesorios de los módulos FV</p> 	MMA0010	SumSol	Cable solar macho-hembra MC4 de 3 metros. 4 mm <sup>2</sup> .
<p>Estructura de aluminio</p> 	FA10M05190	SumSol	Estructura inclinada (15-30-45°), para 5 módulos. 1 fila.

Aplicando la ecuación 2.6 para determinar el número total de módulos se obtuvo:

$$N_T = \frac{4109,44}{250 \cdot 3,58 \cdot 0,9} = 5,10 \approx 5 \quad (3.5)$$

Nótese que  $G_{m\beta}$  es la irradiación del mes más crítico (diciembre) y  $P_G=0,9$

El resultado se redondeó por defecto ya que el resultado se acerca más a 5 que a 6.

Aplicando la ecuación 2.7 para determinar el número de módulos conectados en serie se obtuvo:

$$N_s = \frac{12}{30,40} = 0,39 \approx 1 \quad (3.6)$$

Nótese que  $V_m$  es el voltaje de la batería y es igual a 12 V. Normalmente, éste es de 12 o 24 Voltios para las pequeñas instalaciones pero si la potencia total de consumo supera los 3 kW, la tensión debe ser de 48 o 120 V (Escudero-Pascual 2007).

El resultado se redondeó por exceso ya que el resultado no puede ser cero.

Aplicando la ecuación 2.8 para determinar el número total de módulos conectados en paralelo se obtuvo un total de 5.

La configuración final de los módulos en la rama en paralelo y en serie se muestra en la figura 3.4.

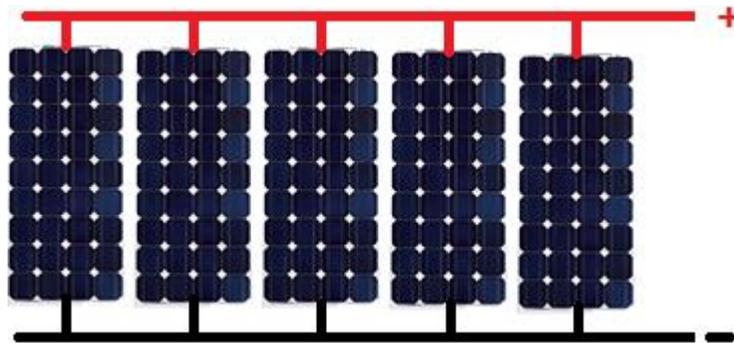


Figura 3.4 Configuración de la conexión de los módulos FV en serie y paralelo.

En el anexo 3.3 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### 3.6.1 Estructura de soporte mecánica para el generador.

El soporte de los módulos FV seleccionado fue el de estructura aluminio para de la serie EA de SumSol mostrado en la figura 3.5, el cual cumple con las siguientes características:

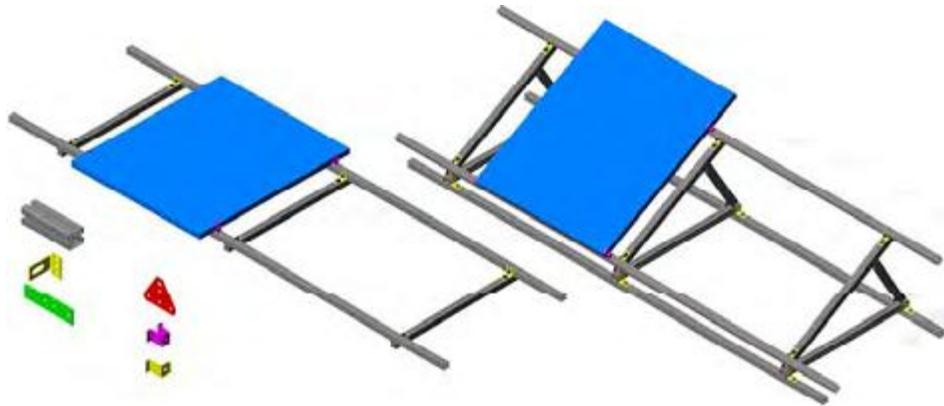


Figura 3.5 Estructura de aluminio de los módulos FV.

**Sistema modular para cualquier tipo de superficie:** La estructura permite instalar de manera rápida y sencilla los módulos fotovoltaicos en cualquier tipo de cubierta, fachada o suelo, a través de su estructura de soporte EA.

**Ligera y robusta:** La estructura está construida con materiales apropiados para su uso en exteriores: aluminio y acero inoxidable. Por este motivo, ofrece unas excelentes propiedades tanto mecánicas como físicas. Gracias a los materiales empleados la estructura es ligera y fácil de transportar e instalar.

**Fácil montaje:** Su diseño es modular y puede alcanzar cualquier tamaño, dependiendo de la potencia de la instalación a realizar, por lo que nuestro departamento técnico estará encantado de asesorarle para cualquier cambio que desee realizar en la estructura o para distintos diseños de la misma. No obstante, debido a su simplicidad, es posible realizarlos diseños y montajes “in situ” en la propia instalación, por muy complicados que sean estos.

**Versatilidad:** Existen dos tipos de configuración básicas: 1-La EAV, para las instalaciones en las que hay que dotar de cierta inclinación a los módulos. 2-La EAF, cuando los módulos van directamente apoyados en la cubierta (coplanar) como se muestra en la figura 3.5.

En el anexo 3.6 se muestran los datos técnicos del soporte de los módulos FV (Sumsol 2014a).

### 3.7 Dimensionado del sistema de acumulación

Para el dimensionado del sistema de acumulación es muy importante tener en cuenta los días de autonomía que se van a otorgar a la instalación, para proyectos domésticos se suelen tomar entre 3 y 5 días de autonomía, 6 o 7 días en caso de tratarse de zonas con baja irradiación donde puedan producirse periodos de varios días en condiciones de poca luz. Para sistemas remotos suelen tomarse 7 y 10 días de autonomía (Europe Sun Fields 2014).

Para el caso de las Jaimas de Tindouf se consideró que la máxima profundidad de descarga de la batería  $P_d=0,6$  y los días de autonomía  $N=2$ .

Aplicando las ecuaciones 2.9 y 2.10 se obtuvo que el sistema de acumulación tiene que tener una capacidad de corriente  $C_n(\text{Ah}) = 1,14 \text{ Ah}$  y capacidad de energía  $C_n(\text{Wh}) = 13,70 \approx 14 \text{ kWh}$ .

Con el cálculo de la capacidad que deben tener las baterías, se deben tomar datos reales de sus características y decidir cuántos acumuladores se tienen que colocar tanto en serie como en paralelo.

Para calcular el número de baterías en serie ( $N_{bs}$ ), se divide la tensión nominal de la instalación ( $V_N$ ) entre la tensión nominal de la batería ( $V_{Nbat}$ ) como lo muestra la ecuación 3.7 (Escudero-Pascual 2007).

$$N_{bs} = \frac{V_N}{V_{Nbat}} = \frac{12}{12} = 1 \quad (3.7)$$

Nótese que el voltaje nominal de la batería escogido ( $V_{Nbat}$ ) es igual a 12.

El cálculo del número de baterías en paralelo ( $N_{bp}$ ) mostrado en la ecuación 3.8 se realiza de forma análoga a la 3.7, se divide la capacidad de corriente calculada  $C_n(\text{Ah})$  entre la capacidad de corriente de la batería seleccionada (Mora 2008).

$$N_{bp} = \frac{C_n(\text{Ah})}{C_{nb}(\text{Ah})} = \frac{1.14}{6.6} = 0,1727 \approx 1 \quad (3.8)$$

Nótese que  $C_{nb}(Ah)=6,6$  Ah. Las características de la batería seleccionada se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Características de la batería seleccionada

Componente	Modelo	Proveedor	Descripción
	AG1200616	SumSol	Acumulador monoblock gel Sonnenschein S12/6,6 S. 6,6Ah/C100. 12Vcc.

En el anexo 3.3 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### 3.7.1 Características de la batería Sonnenschein Solar

Las baterías Sonnenschein Solar están especialmente diseñadas para su uso en aplicaciones solares de pequeña y mediana potencia. Las ventajas de las baterías “sin mantenimiento” VRLA se realzan por la gran reputación e imagen técnica de la tecnología dryfit en todo el mundo. Sus aplicaciones típicas son alimentación eléctrica en segunda vivienda, instalaciones solares de alumbrado, sistemas de señalización, contadores de parking, teléfonos de emergencia y otros suministros de energía de equipos de seguridad.

#### Características generales:

- VRLA reguladas por válvula.
- Placas planas tipo rejilla.
- Capacidad nominal de 6,6 a 230 Ah.
- Baterías tipo monoblock.
- Vida útil > 800 ciclos, para un 60% de descarga en  $C_{10}$ .
- Libres de mantenimiento.
- A prueba de descargas profundas, de acuerdo a DIN 43539 parte 5.
- Reciclables.

Los datos técnicos de la batería Sonnenschein Solar se muestran en el anexo 3.7 (Sumsol 2014a).

### 3.8 Dimensionado del regulador

Para calcular la corriente de la carga de AC se consideró que el voltaje de los equipos instalados en las Jaimas es de 220 V. Sustituyendo el valor de la  $P_{ac}$  en la ecuación 2.13 se obtuvo un valor de  $I_C=2,19$  A.

Para calcular la corriente del generador eléctrico ( $I_G$ ) se consideró que el rendimiento global del módulo toma un valor de  $\eta_m=0,75$ . Los datos de  $P_p$  provistos por el fabricante en la ficha técnica, así como el valor de  $N_r$  calculado en el epígrafe 3.6, se sustituyen en la ecuación 2,12 y se obtuvo que la corriente al máximo rendimiento del generador es de 6,17 A.

Una vez conocidos los valores de  $I_G$  y  $I_C$  se compararon entre sí y se obtuvo que el regulador tiene que una corriente de 30.83 A, por eso se decidió seleccionar el regulador con las características mostradas en la tabla 3.5.

En el anexo 3.4 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

Tabla 3.5. Características del regulador seleccionado.

Componente	Modelo	Proveedor	Descripción
	RR14403000	SumSol	Regulador SumSol RS-40. 40/30A, 12/24Vcc. Display digital. Señal arranque grupo.

#### 3.8.1 Características del regulador SumSol RS

El regulador SumSol RS está diseñado y fabricado para su aplicación en instalaciones fotovoltaicas aisladas. Su fiabilidad y versatilidad lo convierte en un equipo dirigido a todo tipo de sistema con cualquier tipo de acumulador.

Presentan un diseño compacto y de fácil instalación. Sus indicadores de estado le darán una completa información al instante del estado de su instalación: estado de carga de la batería, error en el sistema, etc. También incorpora un display digital en el que se podrá visualizar la tensión a la que se encuentra la batería, el estado de la misma, fase de carga, temperatura, energía generada, energía consumida en corriente continua, etc.

También dispone de un relé libre de potencial que se puede utilizar para la emisión de una alarma o para la orden de arranque de grupo. El regulador está protegido contra inversión de polaridad en la línea de baterías, pero no en la línea de paneles. Lleva incorporado un diodo “anti-retorno” en la parte de entrada de paneles para evitar la descarga por la noche o cuando los paneles no generen tensión. También incorpora una sonda de temperatura para conseguir una carga más óptima de las baterías, compensando la misma en función de la temperatura que exista en el lugar de la instalación.

En el anexo 3.8 se detallan las características técnicas del regulador SumSol RS (Sumsol 2014a).

### **3.9 Dimensionado del inversor**

En este paso se tomó como consideración que todos los equipos de AC no estarán funcionando a la vez, por eso, se multiplica la potencia  $P_{AC}$  por un factor de funcionamiento del 75 %. Con los datos de la tabla 3.1 se obtuvo la  $P_{AC}$  total para una Jaima, sustituyéndola en la ecuación 2.14 se obtuvo el resultado de la ecuación 3.7.

$$P_{inv} \approx 0,75 \cdot P_{AC} \approx 0,75 \cdot 418 = 360,75 \text{ W} \quad (3.7)$$

El inversor debe tener una potencia superior a 360.75 W, por eso se decidió seleccionar el inversor con las características mostradas en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características del inversor seleccionado.

Componente	Modelo	Proveedor	Descripción
<p>Inversor</p> 	CA208010	SumSol	Inversor Phoenix 12/800. 800VA, 12Vcc. Senoidal.

En el anexo 3.3 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### 3.9.1 Características del inversor Phoenix

Desarrollado para uso profesional, la gama de inversores Phoenix es ideal para innumerables aplicaciones. El criterio utilizado en su diseño fue el de producir un verdadero inversor sinusoidal con una eficiencia optimizada pero sin comprometer su rendimiento. Al utilizar tecnología híbrida de alta frecuencia, obtenemos como resultado un producto de la máxima calidad, de dimensiones compactas, ligero y capaz de suministrar potencia, sin problemas, a cualquier carga.

#### Características generales:

**Gran potencia instantánea:** Una de las características singulares de la tecnología SinusMax consiste en su muy alta potencia de arranque. La tecnología de alta frecuencia convencional no ofrece un rendimiento tan extraordinario. Los inversores Phoenix, sin embargo, están bien dotados para alimentar cargas difíciles, como ordenadores o herramientas eléctricas de baja potencia.

**Interruptor on/off remoto:** Conector para interruptor remoto on/off disponible en todos los modelos.

**Disponible con dos tomas de corrientes distintas:** Para evitar que el usuario conecte cargas de mayor potencia que la admitida por el inversor y que este se averíe, SumSol suministra normalmente los equipos con enchufes IEC-320.

Las características técnicas del inversor Phoenix se muestran en el anexo 3.9 (Sumsol 2014a).

### **3.10 Dimensionado del cableado**

La longitud del cableado depende mucho del emplazamiento la instalación. En cualquier caso, conviene instalar lo más cerca posible entre sí los paneles fotovoltaicos, el sistema de regulación y el sistema de acumulación (las baterías). De esta forma, las caídas de tensión en los cables son menores, las secciones necesarias también, así como la longitud del cable y su coste.

La sección se elige en función de la longitud de los cables y de la corriente que circula por ellos con el fin de minimizar las caídas de tensión.

Para este trabajo se escogió un cableado calibre 18 que soporta de 7 a 10 Amperes cuya resistividad es  $20 \Omega$  por cada 1 Km de distancia, con una sección transversal de  $0,82 \text{ mm}^2$ . Teniendo en cuenta las dimensiones de las Jaimas, se consideró utilizar un cableado de 45 metros de longitud. Sustituyendo estos datos en la ecuación 2.15 y 2.16 se obtuvo una potencia de pérdidas en los conductores de 2,80 W para una corriente de carga estimada de 1,6 A.

En el anexo 3.3 se muestra una captura de la hoja de cálculo en Excel donde se puede observar los resultados descritos en este epígrafe.

### **3.11 Simulación de los módulos ISF-205**

Si bien disponer de un modelo teórico es el paso previo al estudio de cualquier tipo de sistema, el siguiente paso consiste en conocer los valores numéricos de los parámetros que permiten simular exactamente el comportamiento del

sistema real bajo estudio. Normalmente se dispone de los valores nominales que proporcionan los fabricantes. Estos parámetros están sujetos tanto a una limitación en precisión como en vigencia debido al envejecimiento del sistema. Para comprobar el efecto que tendrá la temperatura sobre los módulos fotovoltaicos escogidos, se procede primeramente a obtener el modelo matemático que ayude a analizar el comportamiento eléctrico del panel. Para esto, se utilizó una herramienta programada en Matlab donde se obtuvieron las gráficas de I-V, P-V y P-I que coinciden con los datos de la ficha técnica del fabricante. La pantalla principal de la aplicación en Matlab desarrollada en el Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM) se muestra en la figura 3.6.

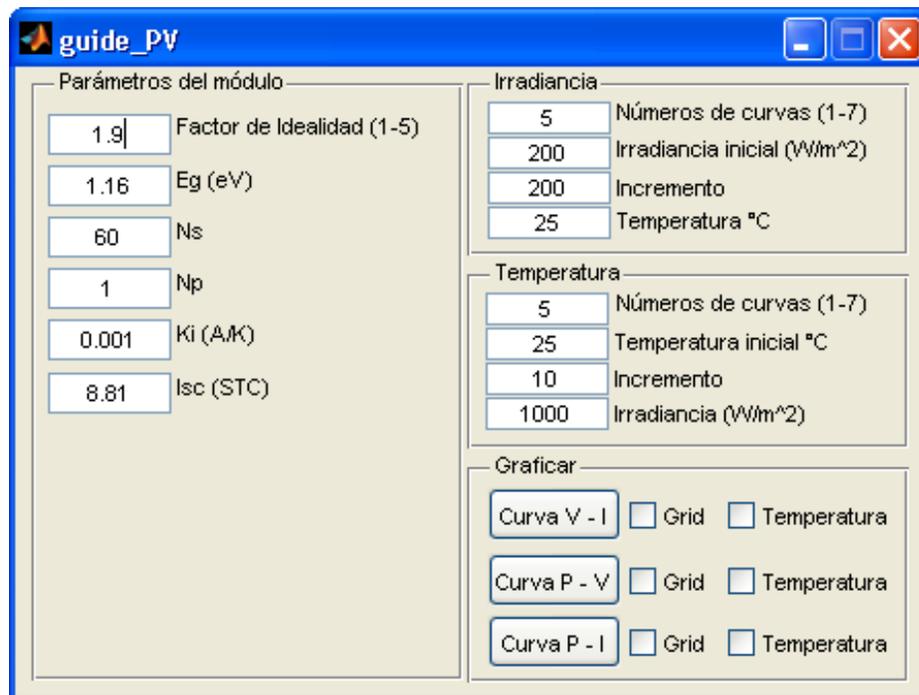


Figura 3.6 Pantalla principal de la aplicación en Matlab.

Como se puede observar en la figura anterior, los datos de entrada se introducen en la parte izquierda y en la parte derecha se introducen los valores de las gráficas que se deseen, donde:

**Factor de idealidad (1-5):** es un valor adimensional que depende del material semiconductor de construcción del módulo. Según (Das & Pradhan 2011) está en el rango de 1 a 5.

**Eg:** es la diferencia entre la energía de la zona de valencia y la energía de la zona de conducción, se expresa en ElectronVolt (eV). Para este tipo de módulo compuesto por silicio monocristalino (Sumsol 2014a) toma un valor de 1.16 (Madougou *et al.* 2010).

**Ns:** es el número de celdas conectadas en serie, es un valor adimensional. Según el fabricante (Sumsol 2014a) del módulo escogido es 60.

**Np:** es el número de celdas conectadas en paralelo, es un valor adimensional. Según el fabricante (Sumsol 2014a) del módulo escogido es 1.

**Ki:** es el coeficiente que representa el incremento de la corriente con la temperatura, se expresa en A/K. Según el fabricante (Sumsol 2014a) toma un valor de 0.001 A/K.

**Isc:** es la corriente de cortocircuito del módulo, según el fabricante (Sumsol 2014a) toma un valor de 8,81 A.

### 3.11.1 Influencia de la irradiancia en los módulos ISF-250.

Como se puede observar en la figura 3.6, a la aplicación en Matlab sólo se le pasa como datos de entrada la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y el coeficiente  $K_i$  proporcionados por el fabricante. Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran que las curvas características de I-V, P-V y P-I que coinciden con los demás parámetros que se ofrecen en la ficha técnica del fabricante en el anexo 3.5. Esto demuestra la veracidad del modelo empleado en la programación de la aplicación en Matlab. El modelo mostrado en la ecuación 3.8 (Das & Pradhan 2011) fue el que se empleó para las simulaciones realizadas en Matlab.

$$I = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_{rs} \cdot \left( \exp \left( \frac{q}{K \cdot T \cdot A} \cdot \frac{V}{N_s} \right) - 1 \right) \quad (3.8)$$

Donde:

$I_{ph}$ : es la fotocorriente generada por los módulos FV

$I_{rs}$ : es la corriente de saturación inversa a la temperatura de referencia

T: es la temperatura de trabajo de los módulos FV

V: voltaje de los módulos FV

Las demás variables fueron explicadas en el epígrafe anterior.

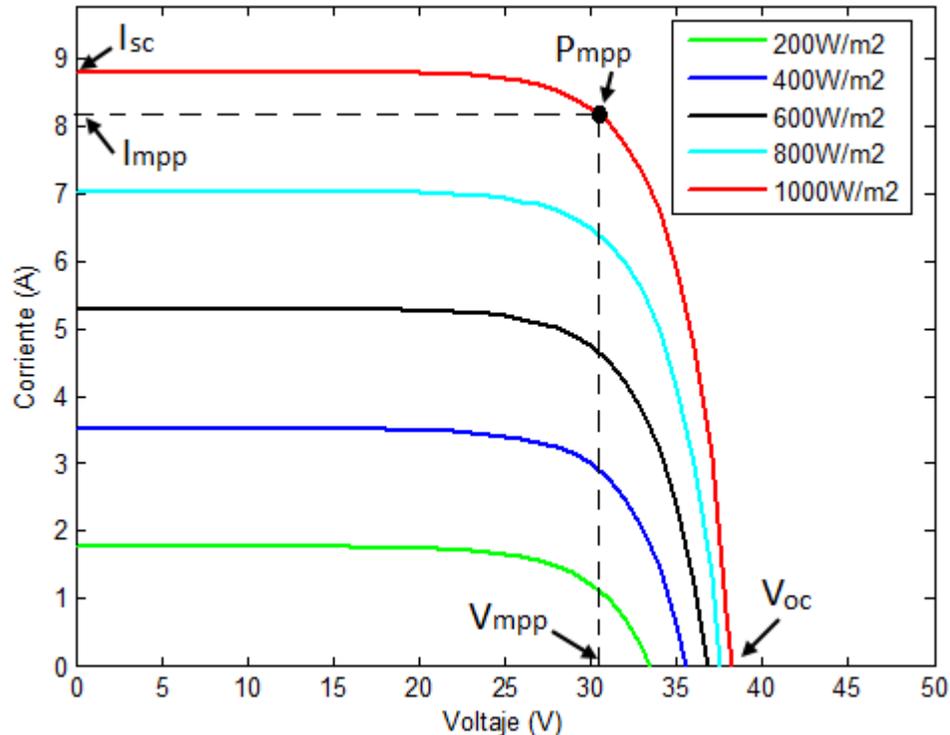


Figura 3.7 Curva característica I-V para diferentes valores de irradiancia a la temperatura de 25 °C.

En la figura 3.6 se muestra el punto de máxima potencia ( $P_{MPP}$ ) con un punto negro sobre el valor de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, donde se observa que:

- Corriente de cortocircuito,  $I_{sc} \approx 8,81$  A
- Voltaje a circuito abierto,  $V_{oc} \approx 37,6$  V
- Potencia máxima,  $P_{mpp} \approx 250$  Wp
- Voltaje en el punto  $P_{mpp}$ ,  $V_{mpp} \approx 30,4$  V
- Corriente en el punto  $P_{mpp}$ ,  $I_{mpp} \approx 8,22$  A

Los valores obtenidos corresponden a las condiciones estándar de medida explicada anteriormente en el epígrafe 2.5.1.

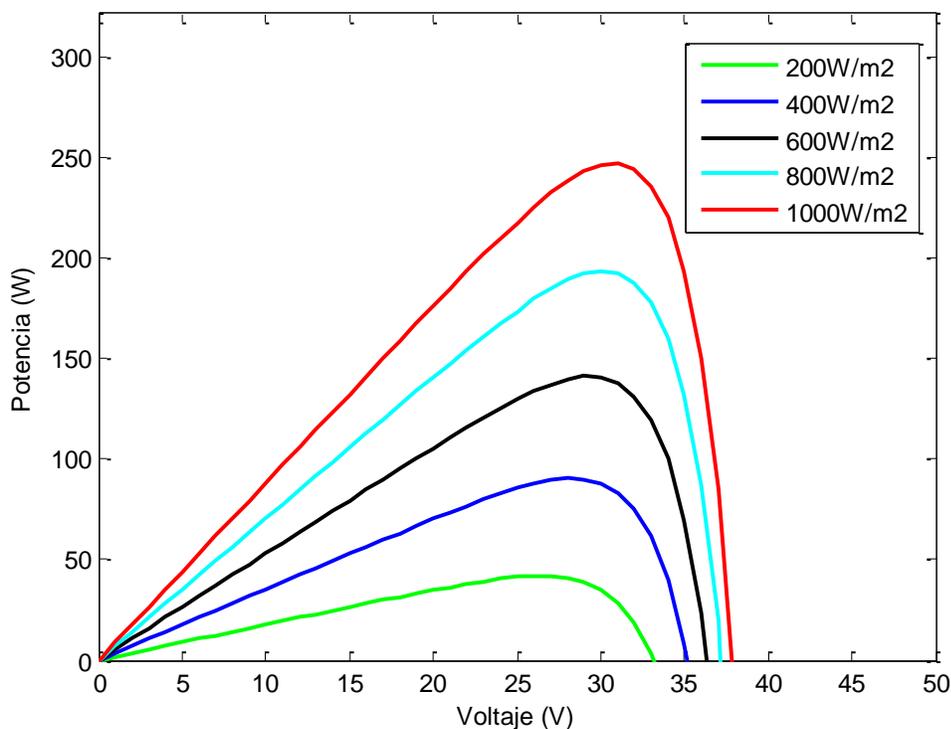


Figura 3.8 Curva característica P-V para diferentes valores de irradiancia a la temperatura de 25 °C.

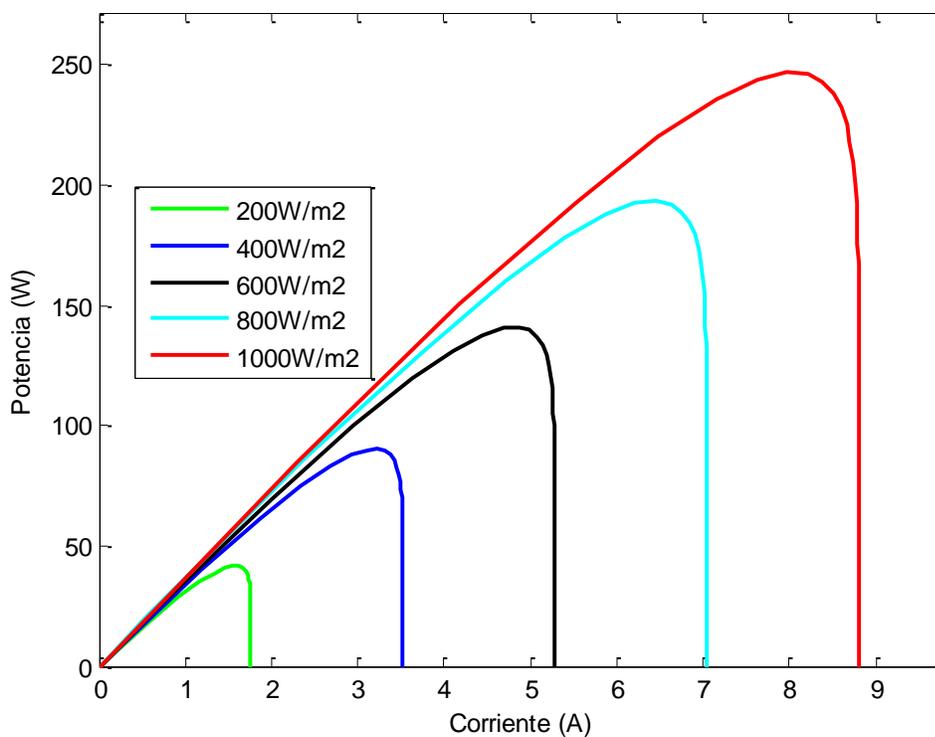


Figura 3.9 Curva característica P-I para diferentes valores de irradiancia a la temperatura de 25 °C.

### 3.11.2 Influencia de la temperatura en los módulos ISF-250.

Con la simulación anterior de las distintas curvas que responden al comportamiento de los módulos ISF-250 se pudo comprobar que está en correspondencia con el modelo que describe adecuadamente a estos módulos. El siguiente paso es comprobar el efecto que tiene la temperatura de las localidades desérticas de Tindouf sobre éstos.

En la figura 3.10 y 3.11 se muestran el resultado de la simulación obtenida.

Como se puede observar en la figura 3.10, a la temperatura de 45 °C que es la máxima que se alcanza en las localidades desérticas de Tindouf, el valor de Voc disminuye aproximadamente un 7 %, con Voc  $\approx$  35 V.

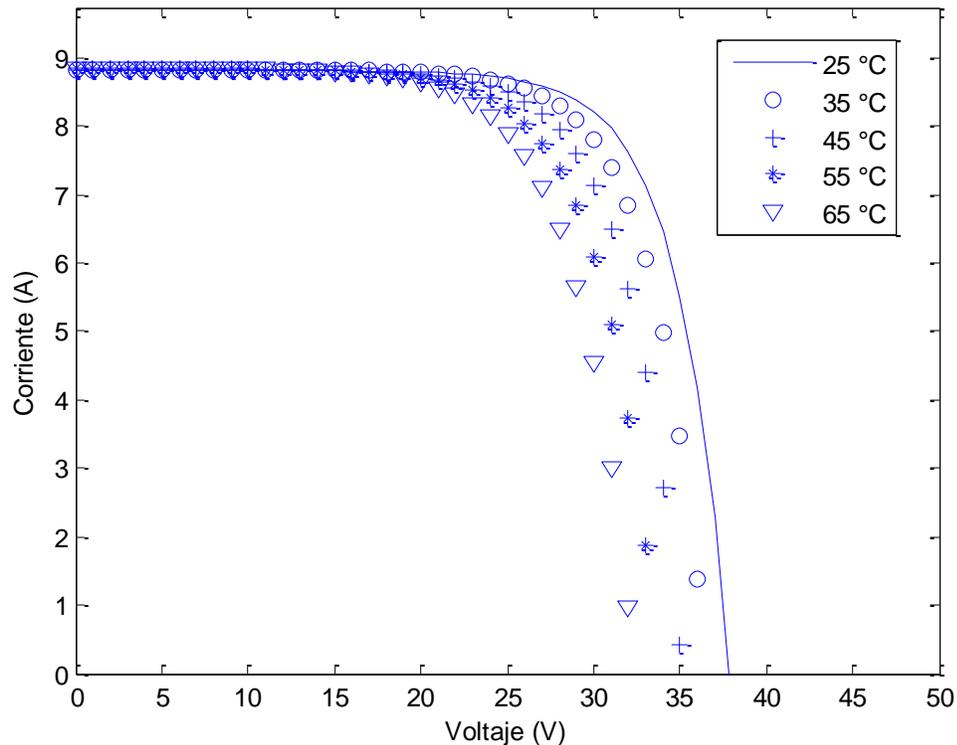


Figura 3.10 Curva característica I-V para diferentes valores de temperatura a la irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Como se puede observar en la figura 3.11, a la temperatura de 45 °C que es la máxima que se alcanza en las localidades desérticas de Tindouf, el valor de Voc disminuye aproximadamente un 7 %, con Voc  $\approx$  35 V y el valor de Pmp

disminuye aproximadamente un 10,36 %, con potencia máxima  $\approx 224,1$  Wp.

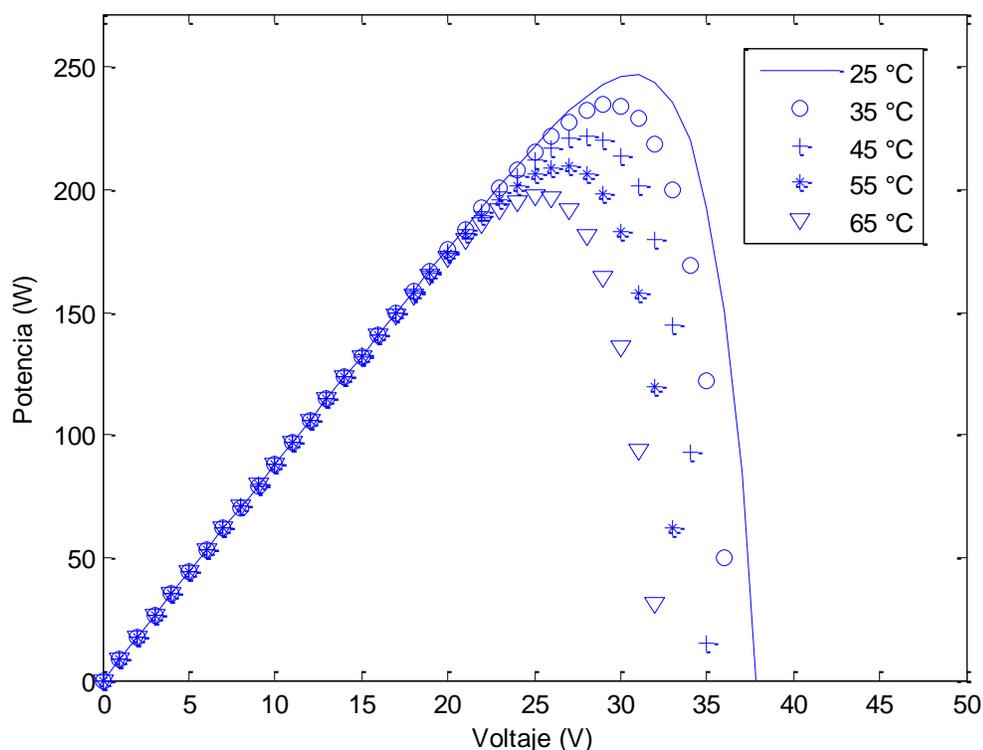


Figura 3.11 Curva característica P-V para diferentes valores de temperatura a la irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

### 3.12 Valoración económica del SFVA propuesto

Para la estimación total de la inversión que se necesita para la implementación del SFVA propuesto se consultó la tarifa vigente de la empresa SumSol (Sumsol 2014b). La cantidad de componentes está especificada entre paréntesis, las estimaciones de los costos fueron:

Módulos fotovoltaicos ISF-250 (5) = 1725,85 €

Accesorios de los módulos FV = 97,62 €

Estructura de aluminio (1) = 353,99 €

Regulador (1) = 168,10 €

Batería (1) = 47,55 €

Inversor (1) = 363,02 €

Cableado (45 m) = 67,25 €

**Costo Total = 2823,38 €**

En el anexo 3.10 se muestra una tabla con los datos técnicos de la tarifa vigente de la empresa SumSol.

### **3.13 Impacto ambiental del SFVA**

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye, frente a los combustibles fósiles, una fuente inagotable, contribuye al autoabastecimiento energético y es menos perjudicial para el medio ambiente, evitando los efectos de su uso directo (contaminación atmosférica, residuos, etc.) y los derivados de su generación (excavaciones, minas, canteras, pozos, etc.).

Los efectos de la energía solar fotovoltaica sobre los principales factores ambientales son explicados en el blog de internet de (Technologysolar 2014), a continuación se contextualizan estos efectos al objeto de estudio.

**Clima:** La generación de energía eléctrica directamente a partir de la luz solar no requiere ningún tipo de combustión, por lo que no se produce polución térmica ni emisiones de CO<sub>2</sub> que favorezcan al efecto invernadero.

**Suelo:** Al no producirse ni contaminantes, ni vertidos, ni movimientos en la tierra, la incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosión es nula. Además, en este trabajo se propone el emplazamiento de los paneles sobre los techos de los cuartos de las viviendas.

**Aguas Superficiales y subterráneas:** Aunque en Tindouf se pueden encontrar algunos oasis, este tipo de tecnología no produce alteración de los acuíferos o de las aguas superficiales ni por consumo, ni por contaminación por residuos.

**Flora y Fauna:** La repercusión sobre la vegetación es nula y al no contar con tendidos eléctricos, se evitan los posibles efectos perjudiciales para las escasas aves que pudieran circular por Tindouf.

**Paisaje:** Los paneles solares tienen distintas posibilidades de integración, lo que hace que sean un elemento fácil de integrar y armonizar en diferentes tipos de estructuras, minimizando su impacto visual. Además, al tratarse de sistemas autónomos, no se altera el paisaje con postes ni líneas eléctricas.

**Ruidos:** El sistema fotovoltaico es absolutamente silencioso por lo que no afecta desde este punto de vista a las viviendas aisladas de Tindouf.

**Medio Social:** El suelo necesario para instalar un sistema fotovoltaico de dimensión media, no representa una cantidad significativa como para producir un grave impacto. Para el caso de estudio analizado, los paneles fotovoltaicos se colocarán en los tejados de las viviendas, por lo que no habrá perjuicios al medio social.

## Conclusiones

1. La localidad de Tindouf al oeste de Argelia posee excelentes condiciones de irradiación solar que permiten la instalación de un sistema fotovoltaico, los niveles de irradiación se mantienen en valores aceptables durante todo el año y oscilan entre 3.16 y 8.11 kWh/m<sup>2</sup> como promedio.
2. La potencia eléctrica máxima que debe satisfacer el sistema fotovoltaico propuesto es de 460 W y una energía de 4.10 kWh diarios, los paneles deben tener un ángulo óptimo de inclinación de 22.85° orientación al sur.
3. Debido a la variabilidad del clima presente en la localidad, los paneles solares seleccionados trabajan gran parte del año a altas temperaturas próximas a los 45°C, lo cual disminuye la eficiencia en la generación de potencia en un 10.36 % con respecto a la temperatura del trabajo nominal de unos 25°C.
4. Se implementó el método utilizado en una hoja de cálculo en Excel para favorecer las correcciones de los resultados y una aplicación en Matlab para determinar la incidencia de los cambios de temperatura ambiente en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos seleccionados.

## Recomendaciones

1. Implementar la electrificación de las viviendas de Tindouf con la utilización del sistema fotovoltaico propuesto.
2. Gestionar una forma de funcionamiento adecuado que permita implementar los resultados de la siguiente investigación.
3. Calcular el efecto de sombra entre los paneles fotovoltaicos.

## Bibliografía

1. AGUILERA, J. & L. HONTORIA. 2012. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos In *Proceedings of the Curso de Energía Solar Fotovoltaica*, GRUPO IDEA. DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA.2012 ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR. UNIVERSIDAD DE JAÉN, 26.
2. AXESOR. 2014. Información general de Sumsol Energia Solar Sl. In., p. 2.
3. BREVA, J. G. 2014. Razón de ser de la fotovoltaica. In *Clips de Energía*. vol. 10, p. 10.
4. CHAPMAN, R. N. 1987. Sizing Handbook for stand alone photovoltaic/storage systems. Sandia National Laboratories April 1987.
5. DAS, D. & S. K. PRADHAN. Modeling and simulation of PV array with boost converter: an open loop study. NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ROURKELA, 2011.
6. EGIDO, M. A. Sistemas fotovoltaicos autónomos: Componentes y dimensionado”. Documentación del máster de energías y combustibles para el futuro., 2010.
7. EGIDO, M. A. & E. LORENZO. 1992. The sizing of stand alone pv systems: a review and proposed method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 26.
8. ES.DB-CITY.COM. 2014. Tinduf.
9. ESCUDERO-PASCUAL, A. 2007. Unidad 15: Sistemas de energía solar fotovoltaica sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones. Dimensionado. In.: Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, p. 16.
10. EUROPE SUN FIELDS, E. 2014. Cálculo sistemas fotovoltaicos autónomos. In.
11. GAVILÁN, C. A. R. Análisis del comportamiento eléctrico de un panel fotovoltaico mediante matlab. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ, 2011.

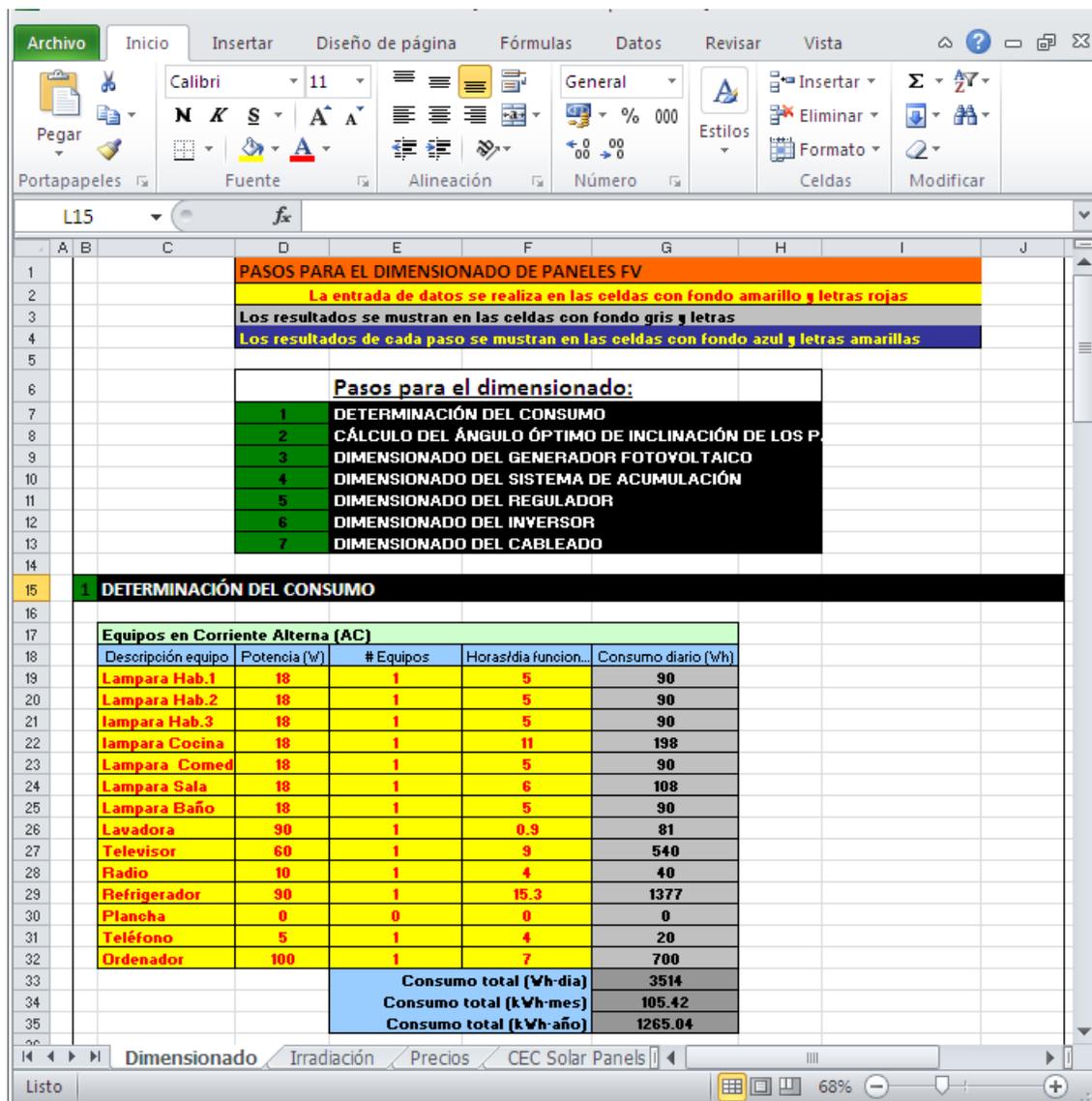


12. HANS. 1994. *Aplicaciones Prácticas Energía Solar*
13. LORENZO, E. 2013. La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y “el cascabel del gato”. In.: Instituto de Energía Solar. Universidad Politécnica de Madrid.
14. MADOUYOU, S., M. KAKA & G. SISSOKO. 2010. *Silicon Solar Cells: Recombination and Electrical Parameters, Solar Energy*. 13 p. ISBN 978-953-307-052-0.
15. MOLINA, M. G., P. E. MERCADO & P. E. WIERNES. 2007. Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 11, 8.
16. MORA, C. R. P. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2008.
17. N.A.S.A., A. S. D. C. 2014. NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables. In.
18. NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY, B., MD, USA. 2014. Hamada de Tindouf: Argelia. In.
19. R.A.C.E.F.N., R. A. D. C. E. F. Y. N. & R. A. D. I. R.A.I. 2004. *Diccionario español de la energía. Con vocabulario inglés-español*.: 818 p. ISBN 84-9744-025-0.
20. SAHARAUI, C. A. P. 2014. Conoce al pueblo Saharaui. In.
21. SIDRACH-DE-CARDONA, M. & L. M. LÓPEZ. 1998. A simple model for sizing stand alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 55.
22. SIDRACH-DE-CARDONA, M. & L. M. LÓPEZ. 1999. A general multivariate qualitative model for sizing stand alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 59.
23. SOLAREX. 1998. MSX-60 and MSX64 Photovoltaics modules. In.
24. SOLARGIS. 2014. Maps of Global horizontal irradiation (GHI ). In.



25. STOLIK, D. 2014. Estrategia fotovoltaica FV en Cuba hasta el 2030. In. Universidad de la Habana, p. 3.
26. SUMSOL. 2014a. Catálogo de productos (fichas técnicas). In.
27. SUMSOL. 2014b. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA TARIFA P.V.P. In.
28. TECHNOLOGYSOLAR. 2014. Impacto ambiental. In.
29. UNIVERSITAIRES, O. D. P. 1988. *Atlas Solaire de l'Algérie*. Office des Publications Universitaires.

### Anexo 3.1 Hoja de cálculo en Excel con la programación del primer paso del dimensionado del SFVA



**PASOS PARA EL DIMENSIONADO DE PANELES FV**

La entrada de datos se realiza en las celdas con fondo amarillo y letras rojas

Los resultados se muestran en las celdas con fondo gris y letras

Los resultados de cada paso se muestran en las celdas con fondo azul y letras amarillas

**Pasos para el dimensionado:**

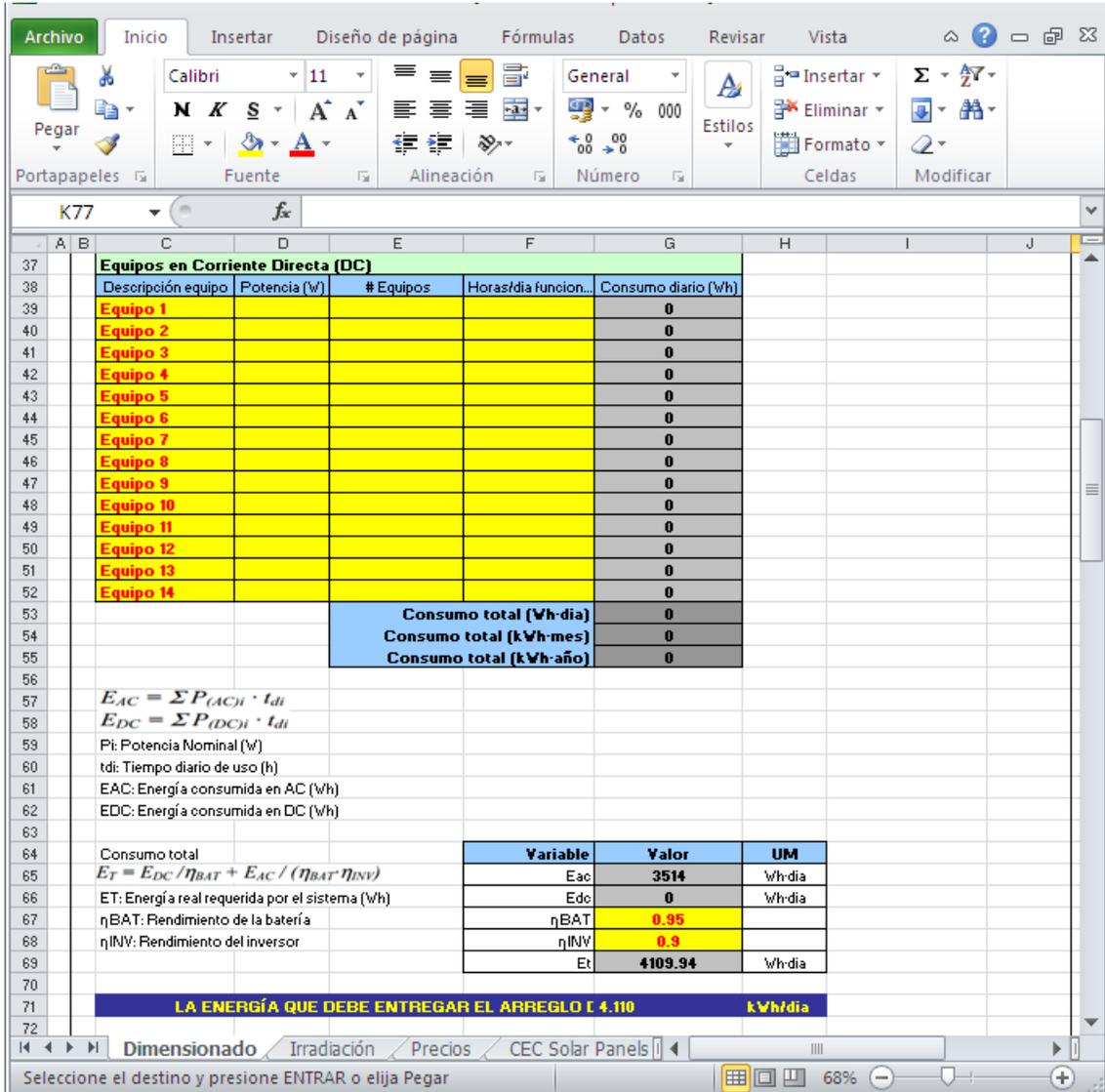
- 1 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO
- 2 CÁLCULO DEL ÁNGULO ÓPTIMO DE INCLINACIÓN DE LOS P...
- 3 DIMENSIONADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO
- 4 DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN
- 5 DIMENSIONADO DEL REGULADOR
- 6 DIMENSIONADO DEL INVERSOR
- 7 DIMENSIONADO DEL CABLEADO

**1. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO**

**Equipos en Corriente Alterna (AC)**

Descripción equipo	Potencia (w)	# Equipos	Horas/día funcion...	Consumo diario (Wh)
Lampara Hab.1	18	1	5	90
Lampara Hab.2	18	1	5	90
Lampara Hab.3	18	1	5	90
Lampara Cocina	18	1	11	198
Lampara Comed	18	1	5	90
Lampara Sala	18	1	6	108
Lampara Baño	18	1	5	90
Lavadora	90	1	0.9	81
Televisor	60	1	9	540
Radio	10	1	4	40
Refrigerador	90	1	15.3	1377
Plancha	0	0	0	0
Teléfono	5	1	4	20
Ordenador	100	1	7	700
<b>Consumo total (Wh-día)</b>				<b>3514</b>
<b>Consumo total (kWh-mes)</b>				<b>105.42</b>
<b>Consumo total (kWh-año)</b>				<b>1265.04</b>

### Anexo 3.1 Hoja de cálculo en Excel con la programación del primer paso del dimensionado del SFVA (continuación)



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following content:

Equipos en Corriente Directa (DC)	Descripción equipo	Potencia (w)	# Equipos	Horas/día funcion...	Consumo diario (wh)
Equipo 1					0
Equipo 2					0
Equipo 3					0
Equipo 4					0
Equipo 5					0
Equipo 6					0
Equipo 7					0
Equipo 8					0
Equipo 9					0
Equipo 10					0
Equipo 11					0
Equipo 12					0
Equipo 13					0
Equipo 14					0
Consumo total (Wh-día)					0
Consumo total (kWh-mes)					0
Consumo total (kWh-año)					0

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

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

Pi: Potencia Nominal (W)  
 tdi: Tiempo diario de uso (h)  
 EAC: Energía consumida en AC (Wh)  
 EDC: Energía consumida en DC (Wh)

Variable	Valor	UM
Eac	3514	Wh/día
Edc	0	Wh/día
$\eta_{BAT}$	0.95	
$\eta_{INV}$	0.9	
Et	4109.94	Wh/día

**Consumo total**  
 $E_T = E_{DC} / \eta_{BAT} + E_{AC} / (\eta_{BAT} \eta_{INV})$   
 ET: Energía real requerida por el sistema (Wh)  
 $\eta_{BAT}$ : Rendimiento de la batería  
 $\eta_{INV}$ : Rendimiento del inversor

**LA ENERGÍA QUE DEBE ENTREGAR EL ARREGLO [ 4.110** kWh/día

## Anexo 3.2 Hoja de cálculo en Excel con la programación del segundo paso del dimensionado del SFVA

Excel interface showing the calculation of the optimal inclination angle for solar panels. The spreadsheet is titled "CÁLCULO DEL ÁNGULO ÓPTIMO DE INCLINACIÓN DE LOS PANELES".

**Datos generales:**

- Latitud (grados): 27.748889
- Longitud (grados): 0
- dia del año: 180

Estimación de la irradiación anual incidente sobre una superficie inclinada de tal manera que maximice la captación de la radiación solar. La inclinación óptima de la superficie se relaciona con la latitud  $\phi$  mediante la expresión  $\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot \phi$

La irradiación anual sobre esta superficie óptima se estima como  $G_s(\beta_{opt}) = G_s(0) / [1 - 4.46 \times 10^{-4} \beta_{opt} - 1.19 \times 10^{-4} \beta_{opt}^2]$

**Calculated values:**

- $G_s(0)$ : 2144.85 (kWh/m<sup>2</sup>·año)
- $\beta_{opt}$ : 22.846733 (grados)
- $G_s(\beta_{opt})$ : 2312.0205 (kWh/m<sup>2</sup>·año)

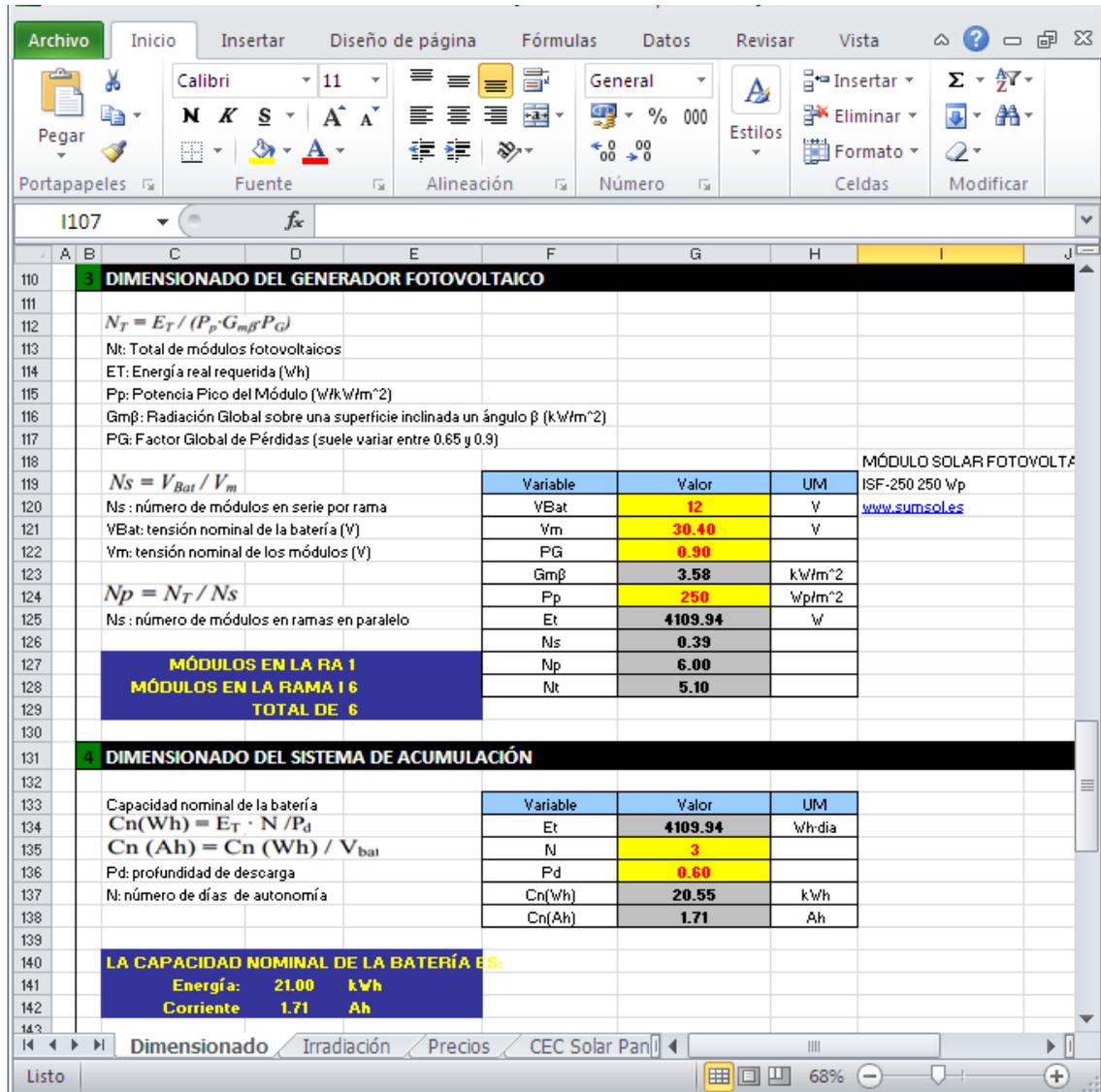
**Relaciones Consumo / Radiación E<sub>T</sub>/G<sub>d</sub>**

Mes	0°	22.85
Enero	27.693	25.690
Febrero	22.031	20.438
Marzo	17.065	15.831
Abril	14.647	13.588
Mayo	13.592	12.610
Junio	13.444	12.472
Julio	13.833	12.832
Agosto	15.143	14.048
Septiembre	17.530	16.263
Octubre	21.255	20.201
Noviembre	26.243	24.345
Diciembre	31.721	29.428

**Summary:**

- EL MES CRÍTICO ES EL QUE TIENE UNA 3.582 (kWh/m<sup>2</sup>) diarios
- EL ÁNGULO ÓPTIMO (grados) DE INCI 22.85
- LA ORIENTACIÓN DE LOS PANELES ES HACIA EL SUR

### Anexo 3.3 Hoja de cálculo en Excel con la programación del tercer y cuarto paso del dimensionado del SFVA



The spreadsheet is divided into two main sections: 'DIMENSIONADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO' and 'DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN'.

**Section 3: DIMENSIONADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO**

Formulas and variables:

- $N_T = E_T / (P_p \cdot G_{m\beta} \cdot P_G)$
- Nt: Total de módulos fotovoltaicos
- ET: Energía real requerida (Wh)
- Pp: Potencia Pico del Módulo (WkWh/m<sup>2</sup>)
- Gm $\beta$ : Radiación Global sobre una superficie inclinada un ángulo  $\beta$  (kWh/m<sup>2</sup>)
- PG: Factor Global de Pérdidas (suele variar entre 0.65 y 0.9)
- $N_s = V_{Bat} / V_m$
- Ns: número de módulos en serie por rama
- VBat: tensión nominal de la batería (V)
- Vm: tensión nominal de los módulos (V)
- $N_p = N_T / N_s$
- Np: número de módulos en ramas en paralelo

Variable	Valor	UM
VBat	12	V
Vm	30.40	V
PG	0.90	
Gm $\beta$	3.58	kWh/m <sup>2</sup>
Pp	250	Wp/m <sup>2</sup>
Et	4109.94	Wh
Ns	0.39	
Np	6.00	
Nt	5.10	

**MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO:** ISF-250 250 Wp, [www.sumsol.es](http://www.sumsol.es)

**Summary:**  
MÓDULOS EN LA RA 1: 6  
MÓDULOS EN LA RAMA I 6: 6  
TOTAL DE 6

**Section 4: DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN**

Formulas and variables:

- Capacidad nominal de la batería
- $C_n(Wh) = E_T \cdot N / P_d$
- $C_n(Ah) = C_n(Wh) / V_{bat}$
- Pd: profundidad de descarga
- N: número de días de autonomía

Variable	Valor	UM
Et	4109.94	Wh-día
N	3	
Pd	0.60	
Cn(Wh)	20.55	kWh
Cn(Ah)	1.71	Ah

**LA CAPACIDAD NOMINAL DE LA BATERÍA ES:**  
Energía: 21.00 kWh  
Corriente: 1.71 Ah

### Anexo 3.4 Hoja de cálculo en Excel con la programación del quinto, sexto y séptimo paso del dimensionado del SFVA

Excel interface showing the calculation sheet for the SFVA dimensioning process. The sheet is titled "Dimensionado" and contains three main sections: 5. DIMENSIONADO DEL REGULADOR, 6. DIMENSIONADO DEL INVERSOR, and 7. DIMENSIONADO DEL CABLEADO.

**5. DIMENSIONADO DEL REGULADOR**

Formulas:  $I_G = I_R \cdot N_R$ ,  $I_R = P_p \cdot \eta_m / V_m$ ,  $I_C = P_{DC} / V_{bat} + P_{AC} / 220$

lg: Corriente del generador  
Ic: Corriente de la carga

Ir: Corriente al máximo rendimiento del generador

Variable	Valor	UM	Variable	Valor	UM
Pp	250.00	Wp/m <sup>2</sup>	Pdc	0.00	W
$\eta_m$	0.75		Vbat	12.00	V
Nr	5		Pac	481.00	W
Ir	6.17	A	Vt	220	V
Ig	30.84	A	Ic	2.19	A

$I_R = \max(I_G, I_C)$  Se comparan las corrientes Ig y Ic y la de mayor nivel será la que soportará el regulador.

**LA CORRIENTE QUE SOPOTARÁ E 30.83881579 A**

**6. DIMENSIONADO DEL INVERSOR**

Como todos los equipos de AC no estarán funcionando a la vez, se multiplica la Pac por un factor de funcionamiento del 75 %.

$P_{inv} = P_{AC}$  Pac = 360.75 W

**EL INVERSOR DEBE TENER UNA POTEI 360.75 W**

**7. DIMENSIONADO DEL CABLEADO**

$P_{PC} = I^2 \cdot R_C$ ,  $R_C = \rho \cdot L / S$

Variable	Valor	UM
I	1.71	A
RC	1.00	$\Omega$
$\rho$	0.02	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
L	50.00	m
S	1.00	mm <sup>2</sup>
PPC	2.93	W

PPC: Potencia de Pérdidas en los conductores (W)  
I: Corriente que circula por los conductores (A)  
RC: Resistencia óhmica de los conductores ( $\Omega$ )  
 $\rho$ : Resistividad del conductor ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )  
L: Longitud de los conductores (m)  
S: Sección de los conductores (mm<sup>2</sup>)

## Anexo 3.5 Datasheet del módulo ISF-250

### Módulos fotovoltaicos Isofotón ISF-240 / ISF-245 / ISF-250

#### CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

	ISF-240	ISF-245	ISF-250
Potencia nominal – Pmax (Wp)	240	245	250
Tensión en circuito abierto – Voc (V)	37,0	37,3	37,6
Tensión en el punto de máxima potencia – Vmax (V)	29,9	30,2	30,4
Corriente de cortocircuito – Isc (A)	8,60	8,70	8,81
Corriente en el punto de máxima potencia – Imax (A)	8,03	8,12	8,22
Eficiencia (%)	14,5	14,8	15,1
Tolerancia de potencia (%/Pmax).	±3	±3	±3

Datos en condiciones estándar de medida (STC): 1.000 W/m<sup>2</sup>; 25° C; 1,5 ATM.

#### CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Dimensiones	1.667 x 994 x 45 mm
Peso	19 kg
Tipo de célula	Silicio monocristalino, con capa antirreflexiva
Tamaño de célula	156 x 156 mm (6")
Número de células por módulo	60 células en configuración 6 x 10
Marco	Aluminio anodizado
Toma de tierra	SI
Máxima carga admisible	5.400 Pa
Vidrio	Alta transmisividad, microestructurado y templado de 3,2 mm
Cajas de conexión	1 x IP-65, con 3 diodos de bypass
Cables	Cable solar de 1 m y sección de 4 mm <sup>2</sup> . Conector MC4 o compatible.
Condiciones embalaje	Caja de 20 módulos
Tamaño embalaje	1.725 x 1.055 x 1.245 mm.

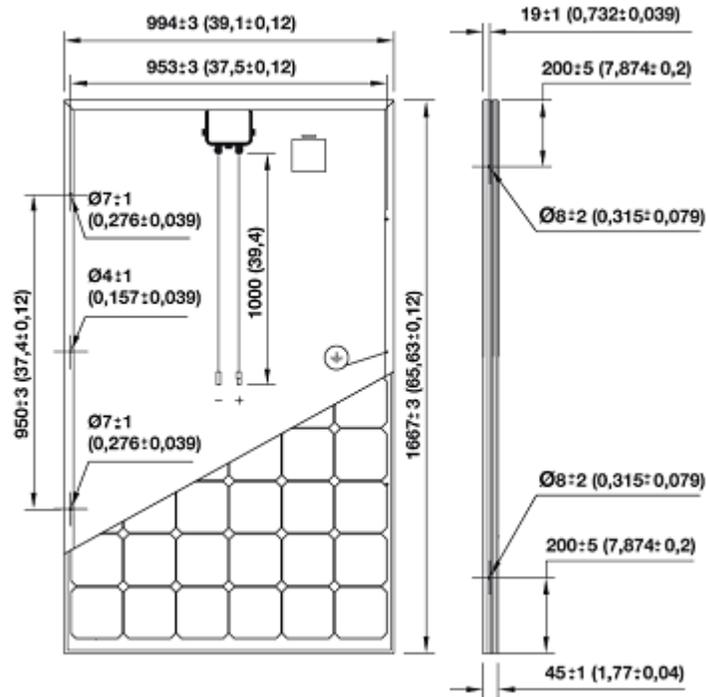
#### PARÁMETROS DE TEMPERATURA

TONC	45°C ±2°C
CCT – Isc	0,042 %/K
CCT – Voc	-0,323 %/K
CCT – Pmax	-0,464 %/K

#### VALORES PARA DISEÑO DEL SISTEMA

Tensión máxima del sistema	1.000 V
Máxima corriente inversa	20 A
Condiciones de operación	De -40 a +85 °C

**Anexo 3.5 Datasheet del módulo ISF-250 (continuación)**



### Anexo 3.6 Datasheet de la estructura de aluminio de los módulos FV.

CARACTERÍSTICAS	
<b>Material</b>	Aluminio, aleación 6063, con tratamiento T6.
<b>Sección</b>	467 mm <sup>2</sup>
<b>Dimensiones</b>	45 x 45 mm
<b>Peso</b>	1,261 kg/m
<b>Material accesorios unión</b>	Acero inoxidable A2 y aluminio.
<b>Material tornillería</b>	Acero inoxidable A2.
<b>Fijación del módulo</b>	Mediante presión del marco de aluminio, permitiendo la fijación por la parte frontal de este.
<b>Suministro</b>	En perfiles de longitud estándar de 3 metros (Longitud especial de 6 metros. Consultar otras longitudes). Incluye todos los accesorios de unión y la tornillería necesaria para cada configuración Incluye instrucciones de instalación y planos de montaje y corte. No incluye las fijaciones necesarias a la cubierta (taco, espárrago, tronillo,...)

### Anexo 3.7 Datasheet de la batería Sonnenschein Solar

CARACTERÍSTICAS GAMA SOLAR						
Modelo	Tensión nominal	Capacidad (Ah)			Medidas (mm) ancho x fondo x alto	Peso Kg
	Vcc	Ah/C <sub>10</sub>	Ah/C <sub>20</sub>	Ah/C <sub>100</sub>		
S12/6.6 S	12	5,1	5,7	6,6	151 x 65 x 98	2,6
S12/17 G5	12	14,3	15	17	181 x 76 x 167	6,1
S12/27 G5	12	23,5	24	27	167 x 176 x 126	9,7
S12/32 G6	12	27,0	28	32	197 x 132 x 184	11,2
S12/41 A	12	34,0	38	41	210 x 175 x 175	14,8
S12/60 A	12	47,5	50	60	261 x 136 x 230	19,0
S12/85 A	12	74,0	76	85	353 x 175 x 190	27,3
S12/90 A	12	78,0	84	90	330 x 171 x 236	31,3
S12/130 A	12	104,5	110	130	286 x 269 x 230	39,8
S12/230 A	12	190,0	200	230	518 x 274 x 238	70,0

## Anexo 3.8 Datasheet del regulador SumSol

<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</b>		
	<b>RS 40</b>	<b>RS 30</b>
Tensión nominal de funcionamiento	12 y 24 Vcc	24 y 48 Vcc
Máxima corriente de carga / consumo	40 / 30 A	30 / 20 A
Máxima sobrecarga admisible	Hasta 25%	
Autoconsumo	<20 mA	
Capacidad borna alimentación	76 A	
Capacidad borna relé	2 A	
Rango de alimentación	De 10 a 36 Vcc	De 20 a 72 Vcc
Compensación de temperatura	2 mV / V / °C	
Rango de temperatura ambiente	De -10 a +50° C (a carga nominal)	
Tipo de regulación	Serie, controlador por microprocesador, Fets	
Modo de regulación	3 etapas: flotación, carga profunda y eculización.	
Modelos de acumuladores soportados	Tubular abierta, tubular gel, monoblock	
Relé de arranque / paro	Por batería baja (programable). Máximo 2A/30Vcc	

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	
Medidas (largo x ancho x alto)	165 x 56 x 105 mm
Peso	0,66 kg
Material de la base	Perfil de aluminio
Material de la tapa	Acero galvanizado
Pintura	Pintura expoxi, al horno
Grado de estanqueidad	IP32
Tropicalización de los circuitos	Sí

## Anexo 3.9 Datasheet del inversor Phoenix

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS												
		180		350			800			1.200		
		12	24	12	24	48	12	24	48	12	24	48
<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</b>												
Potencia de salida CA continua a 25°C (VA) <sup>(2)</sup>	180		350			800			1.200			
Potencia de salida CA continua a 25°C/40°C (W)	175	150	300	300	250	700	700	650	1.000	1.000	900	
Pico de potencia (W)	350		700			1.600			2.400			
Tensión / frecuencia de salida CA <sup>(4)</sup>	230 Vca (±3%) / 50 Hz (±0,1%)											
Rango de tensión de entrada (Vcc)	10,5-15,5	21,0-31,0	10,5-15,5	21,0-31,0	42,0-62,0	10,5-15,5	21,0-31,0	42,0-62,0	10,5-15,5	21,0-31,0	42,0-62,0	
Alarma de batería baja (Vcc)	11,0	22,0	11,0	22,0	44,0	11,0	22,0	44,0	11,0	22,0	44,0	
Apagado por batería baja (Vcc)	10,5	21,0	10,5	21,0	42,0	10,5	21,0	42,0	10,5	21,0	42,0	
Reconexión después de batería baja (Vcc)	12,5	25,0	12,5	25,0	50,0	12,5	25,0	50,0	12,5	25,0	50,0	
Eficacia máxima (%)	87	88	89	89	90	91	93	94	92	94	94	
Consumo en vacío (W)	2,6	3,8	3,1	5,0	6,0	6,0	5,0	4,0	6,0	5,0	6,0	
Consumo en vacío en modo de ahorro (W)	n.a.		n.a.			2,0			2,0			
Protecciones <sup>(2)</sup>	De la "a" a la "e".											
Temperatura de funcionamiento (°C)	De -20 a +50 (refrigerado por ventilador)											
Humedad máxima (sin condensación)	95%											
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>												
Material y color	Aluminio, color azul (RAL 5012)											
Conexiones de la batería	Cables de batería de 1,5 m (el modelo de 180VA con encendedor de cigarrillos)											
Tomas de corriente 230 Vca estándar	IEC-320 (incluye enchufe), CEE 7/4 (Shuko)											
Tipo de protección	IP 20											
Peso (kg)	2,7		3,5			6,5			8,5			
Dimensiones (mm)	Alto	72	72			108			108			
	Ancho	132	155			165			165			
	Fondo	200	237			305			305			
<b>ACCESORIOS</b>												
Panel de control remoto	n.a.											
Interruptor on/off remoto	Conector bifásico											
Conmutador de transferencia automático	Filax (opcional)											
<b>NORMATIVAS</b>												
Seguridad	EN 60335-1											
Emissiones / Normativas	EN 55014-1 / EN 55014-2 / EN 61000-6-2 / EN 61000-6-3											
Notas	(2) Protecciones a) Cortocircuito de salida. b) Sobrecarga. c) Tensión de batería demasiado alta. d) Tensión de la batería demasiado baja. e) Temperatura demasiado alta.			(3) Carga no lineal, factor de cresta 3:1			(4) La frecuencia puede ajustarse por medio del conmutador DIP (sólo en modelos de 750VA)					

**Anexo 3.10 Precios de los componentes del SFVA propuesto, según la tarifa vigente de SumSol**

Componente	Modelo	Proveedor	Descripción	U	Cant.	Precio
Módulos FV	MM2503711	SumSol	Isofotón ISF-250. 250Wp, 37,6Vcc (Voc).Mono.	1	5	345,17
Accesorios de los módulos FV	MMA0010	SumSol	Cable solar macho-hembra MC4 de 3 metros. 4 mm <sup>2</sup> .	1	6	16,27
Estructura de aluminio	FA10M05190	SumSol	Estructura inclinada (15-30-45°), para 5 módulos XH-190M. 1 fila.	1	1	353,99
Regulador	RR14403000	SumSol	Regulador SumSol RS-40. 40/30A,12/24Vcc. Display digital. Señal arranque grupo.	1	1	168,10
Batería	AG1206015	SumSol	Acumulador monoblock gel Sonnenschein SB12/60 A. 60Ah/C100.12Vcc	1	1	47,55
Inversor	CA208010	SumSol	Convertidor Phoenix 12/800. 800VA, 12Vcc. Senoidal	1	1	363,02