

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

Comportamiento energético de un  
Sistema Fotovoltaico Autónomo; efectos del  
sombreado y la variación de las cargas

*Autores: Roberto Rivera Regalado*

*Luis Dayan Reyes Chacón*

**Moa**

**Junio del 2018**

**“Año 60 de la revolución”**

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

**Comportamiento energético de un  
Sistema Fotovoltaico Autónomo; efectos del  
sombreado y la variación de las cargas**

***Autores: Roberto Rivera Regalado***

***Luis Dayan Reyes Chacón***

***Tutor: Dr.C. Reineris Montero Laurencio***

**Moa**

**Junio del 2018**

**“Año 60 de la revolución”**

## **Declaración de autoridad**

*Nosotros: Roberto Rivera Regalado y Luis Dayan Reyes Chacón.*

*Autores de este trabajo de diploma titulado: “Comportamiento energético de un Sistema Fotovoltaico Autónomo; efectos del sombreado y la variación de las cargas”, certificamos su propiedad intelectual a favor del instituto superior minero metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.*

Firma: ..... Fecha:.....

Autor: Roberto Rivera Regalado

Firma: ..... Fecha:.....

Autor: Luis Dayan Reyes Chacón

Firma: ..... Fecha:.....

Tutor: Dr. C.Reineris Montero laurencio



# *Pensamiento*

“Debemos preocuparnos por prestar servicios con eficiencia y óptima calidad, y simultáneamente producir el nuevo hombre que constituye y crea la nueva sociedad socialista, que es el hombre que produce, sirve, dirige, controla y supervisa. Hace falta tener control y supervisión para prestar servicios con eficiencia...Seamos realistas y hagamos lo imposible.”

**Ernesto Che Guevara**

# *Dedicatoria*

*Yo Roberto Rivera Regalado les dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida:*

*A mis padres Roberto y Margarita,*

*A mis abuelas Adelina y Zenaida,*

*A mi novia Zuleiman Cortina Torres.*

*Yo Luis Dayan Reyes Chacón les dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida:*

*A mi madre Zaida María Chacón Fernández, por su apoyo incondicional y su confianza.*

*A mi padre José Luis Reyes Pupo por sus buenos consejos (“...estudia Dayan que la calle no da nada”).*

*A mi padrastro José Ernesto Mayo Zaldívar por ser mi ejemplo profesional a seguir.*

*A mis tíos en especial a Pablo Medina Labrada, porque gran parte de lo que soy ahora se lo debo a él.*

*A mis padrinos en especial a mi madrina querida María Esperanza Ferraz.*

*A mis abuelas bellas en especial a Leovigilda Hernández, por ser mi guía y mi apoyo espiritual.*

*A mis hermanos por ser uno de los mejores regalos que me ha dado la vida.*

*A mi novia Alina Escalona Escalona por apoyarme en todo en estos últimos meses decisivos de mi vida.*

*A mis amigos del aula en especial a mis compañeros de cuarto Roberto Rivera, José Bajuelos y Osvaldo Batista.*

# *Agradecimientos*

*Yo Roberto Rivera Regalado agradezco con todo mi corazón:*

*A Dios por todas sus bondades, por darme la inteligencia necesaria y por guiar mis pasos durante todo este tiempo.*

*A mi familia, por haberme brindado todo el apoyo incondicional durante todo este tiempo para la obtención de este logro.*

*A mis padres Roberto Rivera Matos y Margarita Regalado Muñoz por tener la entrega, dedicación, amor y toda la paciencia del mundo para ser de mí quien soy.*

*A mi novia Zuleiman Cortina Torres por su entrega, dedicación y todo el amor de su vida para con mi persona, por ser quien es y estar siempre a mi lado en todo momento.*

*A mis profesores, en especial Yordan Rojas Guerrero, Osmany Pérez Aballe por estar siempre ahí cuando los molesto y tener toda la paciencia a la hora de responder todas las interrogantes.*

*A mis compañeros de cuarto en especial José Osvaldo Batista, Luis Dayan, Bajuelo, Roberto y los demás que se me quedan.*

*A mi tutor Reineris Montero Laurencio, Dr. C. por su dedicación y su entrega con esta investigación.*

*Yo Luis Dayan Reyes Chacón agradezco con todo mi corazón:*

*A mi tutor Reineris Montero Laurencio, Dr. C. por su dedicación y su entrega con esta investigación.*

*A todos los profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica, por los conocimientos que fueron capaces de formar en mí durante estos cinco años de estudio.*

*A Yordan Rojas Guerrero, Osmany Pérez Aballe y Carlos Cruz por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación.*

*A José Carlos Ruis y Yunaisi Briones por su ayuda con la bibliografía.*

*A Evelio Giménez por sus buenos consejos a la hora de tomar decisiones en la parte experimental.*

*Al secretariado de la FEU por su apoyo tecnológico.*

*Al colectivo de secretarías de la facultad por su apoyo energético durante los días de medición.*

*A la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de cumplir mis sueños.*

*Gracias a todos.*

## Resumen

En la presente investigación se efectúa el análisis del comportamiento de los componentes que integran el sistema fotovoltaico autónomo, teniendo en cuenta los distintos tipos de cargas conformes a las condiciones de operación en Cuba. Para ello se fija una carga partiendo de un nivel determinado, se obtienen los distintos niveles de irradiancia con la estación meteorológica, además se evalúa la autonomía propia del sistema fotovoltaico a partir de los cambios normales que se puedan producir en torno al funcionamiento del mismo, debido a las condiciones atmosféricas. Se miden los parámetros eléctricos de los elementos esenciales que conforman el sistema autónomo, entre estos : el inversor, regulador, batería y el panel fotovoltaico. Se analiza la influencia del efecto del sombreado en uno de los paneles fotovoltaicos, bajo la incidencia de la sombra en varias direcciones y tres niveles de irradiancia. En los experimentos realizados se emplean diferentes instrumentos de medidas de vital importancia para la obtención de los resultados, estos son : trazador de curvas, multímetro digital, estación meteorológica, pirómetro infrarrojo. A partir de las gráficas utilizadas se muestra el comportamiento del sistema fotovoltaico para diferentes condiciones de operación. Además se hace un análisis con la transformada rápida de Fourier para conocer la forma de onda de la salida del inversor. Estos resultados permiten conocer las principales afectaciones de la variación de la carga al SFVA y el efecto de sombreado. El comportamiento eléctrico del panel bajo el efecto de las cargas se manifiesta teniendo en cuenta los niveles de irradiancia, para niveles altos la producción de energía es óptima y para niveles bajos ocurre lo contrario.

**Abstract**

In the present investigation, the behavior of the components that make up the autonomous photovoltaic system is analyzed, taking into account the different types of loads conforming to the operating conditions in Cuba. For this, a load is set starting from a certain level, the different levels of irradiance are obtained with the meteorological station, in addition the autonomy of the photovoltaic system is evaluated from the normal changes that may occur around its operation, due to atmospheric conditions. The electrical parameters of the essential elements that make up the autonomous system are measured, among them: the inverter, regulator, battery and the photovoltaic panel. The influence of the shading effect on one of the photovoltaic panels is analyzed, under the influence of the shadow in several directions and three levels of irradiance. In the experiments carried out, different measurement instruments of vital importance are used to obtain the results; these are curve tracer, digital multimeter, meteorological station, and infrared pyrometer. The behavior of the photovoltaic system for different operating conditions is shown from the graphs used. In addition, an analysis is made with the fast Fourier transform to know the waveform of the inverter output. These results allow to know the main affectations of the variation of the load to the SFVA and the shading effect. The electrical behavior of the panel under the effect of the loads is manifested taking into account the levels of irradiance, for high levels the production of energy is optimal and for low levels the opposite occurs.

## Índice

Introducción .....	1
<b>Capítulo 1 Marco Conceptual. Fundamentos teóricos de la investigación .....</b>	<b>4</b>
1.1 Introducción .....	4
1.2 Trabajos precedentes.....	4
1.3 Generalidades de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos.....	7
1.3.1 Módulos Fotovoltaicos.....	7
1.3.2 Efectos de la irradiancia .....	9
1.3.3 Componentes del sistema Fotovoltaico Autónomo.....	10
1.3.4 Ejemplo de un sistema Fotovoltaico en Cuba .....	18
1.4 Fundamentos teóricos del efecto de las sombras en el comportamiento energético del panel fotovoltaico.....	22
1.4.1 Efectos de los sombreados parciales sobre la instalación fotovoltaica. ....	23
1.4.2 Placas Solares: Caja de conexión y diodos de protección (bypass) .....	23
1.4.3 Sombra: Una tarea especial para el inversor.....	29
1.5 Instalación (Ver anexo #9).....	32
1.6 Conclusiones del capítulo.....	33
<b>Capítulo 2. Materiales y Métodos .....</b>	<b>34</b>
2.1 Introducción .....	34
2.2 Instalación experimental individual.....	34
2.2.1 Módulo fotovoltaico de silicio policristalino.....	34
2.2.2 Características eléctricas. ....	35
2.2.3 Inversor con cargador Multiplus Compact 12/1200/50-16 .....	35
2.2.4 Regulador fotovoltaico Solener RSD 30A 12-24 voltios .....	36
2.2.5 Batería AGM POWER 260Ah. ....	37
2.3 Instrumentos y equipos .....	39
2.3.1 Estación climatológica <i>WatchDog</i> :.....	39
2.3.2 Pirómetro infrarrojo UNI-T UT301C.....	40
2.3.3 Multímetro UT61E.....	41
2.3.4 Osciloscopio Digital Rigol DS1052E.....	41
2.3.5 Trazador de curvas características I-V .....	42

2.3.6 Cargas para los experimentos a realizar.....	44
2.4 Diseño experimental.....	45
2.5 Explicación general del Sistema Fotovoltaico Autónomo .....	46
2.5.1 Diseño de experimental del sombreado .....	48
2.5.2 Experimento 1.....	49
2.5.3 Experimento 2.....	50
2.5.4 Experimento 3.....	50
2.6 Evaluación del comportamiento energético del panel en funciones de diferentes áreas de sombreado.....	51
2.7 Conclusiones del capítulo.....	51
Capítulo 3. Análisis de los Resultados.....	52
3.1 Introducción.....	52
3.2 Resultados experimentales de los efectos de la variación de la carga ....	52
3.3 Resultados experimentales de los efectos de la sombra .....	58
3.5 Conclusiones del capítulo.....	68
Conclusiones generales.....	69
Recomendaciones .....	70
Bibliografía .....	71

## Introducción

Para la evaluación de los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA), se prueban generalmente de manera individual cada uno de los componentes producidos en las plantas productoras. Es una tendencia en la actualidad conformar estos sistemas de manera compacta. Los SFVA se diseñan para pequeñas cargas con potencias entre 300-1000W, sobre todo para aquellos que van a operar en el suministro de energía en viviendas aisladas. Habitualmente siempre están definidas las cargas que van a atender estos sistemas autónomos, principalmente iluminación y otros equipos electrónicos de baja potencia.

Una de las pretensiones de estos sistemas autónomos para brindar servicios a viviendas, es lograr que las cargas sean de una alta eficiencia energética en función de poder conectar mayor cantidad de cargas, ejemplo de esto, luminarias led, equipos de telecomunicaciones, televisores de alta eficiencia, en general demandas de baja energía.

Independientemente de las características que van tomando los SFVA y de las relaciones entre la irradiancia y la producción de energía de los paneles, existen dos elementos con relación a la explotación de estos sistemas que se vinculan con la variabilidad o dinámica de operación de las cargas eléctricas, ellos son: la gestión de la energía que realiza el inversor y la dinámica de operación de las baterías, independientemente de su tecnología constructiva. Los paneles fotovoltaicos están sometidos a diferentes condiciones de operación, entre estas: las temperaturas ambiente, el efecto de las sombras, el ángulo de operación del panel, entre otras. Por su parte, los niveles de radiación que inciden en el panel caracterizan en gran medida su comportamiento térmico, el cual de manera directa incide en la eficiencia de la producción de electricidad del panel.

Por lo general se presta mayor atención a los cálculos impuestos a la operación de Paneles Fotovoltaicos, sin embargo durante su operación existen determinados elementos que afectan la eficiencia, entre ellos las sombras que puedan incidir, las cuales pueden estar definidas por otros paneles fotovoltaicos u otros objetos que de manera irremediable puedan estar influyendo. Estas informaciones pueden obtenerse de manera masiva con el uso del termómetro infrarrojo, para una mejor percepción de la distribución de temperaturas en el panel, y luego compararla con la productividad del mismo. Consecuentemente se puede obtener un comportamiento energético del panel bajo los efectos de la sombra.

El municipio de Moa tiene adecuadas condiciones para realizar experimentos que permitan definir los aspectos térmicos y energéticos de un panel fotovoltaico bajo los efectos de la sombra.

### **Situación Problemática**

Existe diversidad en los sistemas autónomos que operan en diferentes condiciones y lugares en el territorio nacional en los cuales se requiere aplicar métodos que sistematicen sus características operacionales.

Inicialmente los sistemas autónomos que se ponen en explotación se les asignan una determinada carga, la cual en el transcurso del tiempo es cambiada y en ocasiones se manifiestan negligencias insertando a los SFVA cargas eléctricas no estipuladas.

Se requiere en el sistema de enseñanza de las energías renovables en el ISMMM de puestos de laboratorios que de manera integral puedan servir de entrenamiento a los estudiantes de las carreras implicadas en el uso de los sistemas fotovoltaico.

### **Problema de investigación**

Insuficiente conocimiento del comportamiento operacional de un sistema fotovoltaico autónomo, trabajando con diferentes cargas convencionales y bajo el efecto de diferentes situaciones de sombreado.

### **Objeto de estudio**

Sistema fotovoltaico autónomo del aula especializada en energías renovables del Centro de Estudios de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM).

### **Campo de acción**

Evaluación energética de un sistema fotovoltaico autónomo.

### **Objetivo General**

Determinar las regularidades energéticas asociadas a un sistema fotovoltaico autónomo bajo diversas condiciones climatológicas, variaciones de la carga y el efecto del sombreado.

### **Hipótesis**

Si se determinan los efectos del clima y el estado de carga en sistemas autónomos, así como las variaciones energéticas que provoca el efecto del sombreado en dicho

sistema, entonces se puede evaluar las irregularidades energéticas del sistema bajo estas condiciones.

### **Tareas de la investigación**

1. Sistematización en el estado del arte sobre la temática a partir de las diferentes bibliografías y críticas de las literaturas existentes sobre el tema.
2. Instalación del sistema fotovoltaico autónomo.
3. Evaluación del efecto de las cargas en el comportamiento eléctrico del panel, batería e inversor.
4. Evaluación del efecto del sombreado en el comportamiento energético del panel fotovoltaico.
5. Realización los experimentos.
6. Interpretación y análisis de los resultados.

## Capítulo 1 Marco Conceptual. Fundamentos teóricos de la investigación

### 1.1 Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos y tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo de esta investigación. Se exponen las principales características y componentes que conforman los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA). Se presentan ejemplos de SFVA ensamblados en el país, tal es el caso del Combinado Ernesto Che Guevara en la provincia de Pinar del Río. Se aborda sobre las principales afectaciones del sombreado en la generación de energía. Para el montaje de los SFVA en nuestro país existen una serie de normativas, las cuales se dan a conocer en el desarrollo del trabajo.

### 1.2 Trabajos precedentes

La energía fotovoltaica está en pleno desarrollo al ser limpia y provechosa, aunque depende mucho de su fuente de energía (el sol) para producirla. Para ello se realizan diversos estudios para la mejora de productos existentes en el mercado y búsqueda de nuevos materiales que permitan un aprovechamiento mayor de la fuente de energía. El estudio de los componentes que conforman un sistema fotovoltaico autónomo es de suma importancia a la hora de la instalación del mismo, a continuación se muestra un breve resumen de trabajos relacionados con el tema.

Edgar Darío Obando-Paredes\*, Rubiel Vargas-Cañas Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia presenta en su artículo **Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular** un método de modelado, simulación e implementación de un sistema fotovoltaico autónomo. El modelo está basado en un circuito equivalente del panel fotovoltaico; teniendo en cuenta la interacción de éste con los elementos que componen el sistema y con los parámetros medioambientales (radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente) que influyen su funcionamiento. Este circuito equivalente está descrito en términos de fotocorriente, un diodo, una resistencia en serie y una resistencia de juntura. La simulación del desempeño de este modelo se realiza teniendo en cuenta parámetros medioambientales recolectados en un periodo de un año y se valida comparando sus resultados con los de un modelo experimental. Los resultados obtenidos son comparables entre sí en términos de potencia. En este trabajo se tuvo en cuenta tres variables

medioambientales excepto la humedad relativa en el territorio donde se desarrolló el estudio.

Javier Guembe Zabaleta; Pamplona, 28 de junio de 2016 en su trabajo de fin de grado **Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental** realiza la caracterización de un algoritmo de estimación del estado de carga (SOC) para un banco de baterías de plomo-ácido situado en la microrred de la Universidad Pública de Navarra. Para ello, se ha realizado un modelo simplificado para el banco de baterías de plomo-ácido y se ha diseñado un método de estimación que permita conocer su estado de carga con más exactitud que los métodos actuales, con el objetivo de mejorar la gestión energética de la micro red. De la micro red únicamente se dispone información de la corriente y la tensión en bornes de la batería del año 2012. Por lo que tras el caracterizado del algoritmo, se ha implementado el algoritmo en la micro red para evaluar su funcionamiento en tiempo real y la evolución del estado de salud (SOH) en esta investigación se ha visto como el algoritmo tiene problemas en la estimación cuando la diferencia entre la tensión real y la estimada es mayor a 12 V, puesto que la capacidad de regulación principal de la tensión depende de la tensión de circuito abierto.

Daniel Mauricio Mariño Vieira, Bogotá D.C. 2010, en su trabajo de fin de grado, **Sistema de carga de baterías mediante el uso de energía solar**, expone *el desarrollo e implementación de un cargador de baterías del tipo Plomo-Ácido, a partir de energía solar siendo regulada por medio de un convertidor por conmutación que ofrece una alta eficiencia*. En este trabajo se pudo implementar un control micro-procesado que permitiera manipular información de la curva de potencia del panel, con lo que se haría una conversión más eficiente de energía.

Mario Simón Bordón, Leganés, MARZO 2010, en su trabajo de fin de grado, **Estudio y análisis de un regulador de carga para baterías**, en este trabajo se realizó un análisis del comportamiento de un regulador fotovoltaico tipo serie ante diferentes regímenes de operación, a pesar de no ser el objetivo principal de este trabajo se podría optar por comparar el Controlador de Carga con otros reguladores comerciales de varias marcas, tipos, modelos para así hacer más rica y provechosa esta investigación.

Jaume Martínez Bertrán, Barcelona 2017, en su trabajo de fin de grado, **Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas**, se estudia de forma

particular el estado de carga de las baterías y sus métodos de cálculo. En la parte simulada de este estudio en los extremos de la curva es donde más error se cometía como norma general, lo que puede hacer el método poco válido para usar en el caso de que se necesite mucha precisión (por ejemplo, para apagar el dispositivo por batería baja de forma controlada antes de que se apague solo y evitar así una posible pérdida de datos y un posible daño en el mismo).

Frank Alejandro Cruz Meza, junio 2017, ISMMM, en su trabajo de grado, **Implementación de un sistema fotovoltaico con conmutación a la red para parte de las cargas del CEETAM en el ISMMM**, ejecuta un estudio de las cargas de consumo en los equipos del CEETAM, así como el dimensionado del Sistema Solar Fotovoltaico existente en dicho departamento. En este trabajo no se profundizó en el análisis práctico de dicho sistema para verificar cuál era su comportamiento ante las diferentes condiciones de operación.

Jordi Pallejà Cabré, Setiembre 2012, Universitat Rovira i Virgili, en su trabajo titulado **Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico**, realiza un análisis sobre algunas de las afectaciones de la incidencia de las sombras en los paneles fotovoltaicos así como los niveles de conexionados de las celdas fotovoltaicos y sus esquemas eléctricos, en el mismo no se explotaron todas las variantes de sombreados posibles y se desarrollaron parcialmente en direcciones no comunes .

En el artículo nombrado **Gestión de sombras: Funcionamiento eficiente de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas con OptiTrac Global Peak (2017)**: se publica el resultado una investigación donde se expone lo siguiente: “No siempre es evitable que buhardillas, chimeneas o árboles proyecten su sombra sobre las instalaciones fotovoltaicas. Para que no se vea afectada la rentabilidad de una instalación fotovoltaica, hay que minimizar las pérdidas de rendimiento condicionadas por el sombreado, desde la misma fase de planificación. A este respecto, factores de influencia tales como la disposición de los módulos fotovoltaicos, su interconexión y, especialmente, la elección del inversor correcto, desempeñan un importante papel. La toma en consideración de algunas reglas de planificación relevantes permite adaptar dichos factores a la instalación fotovoltaica en cuestión, de forma que la oferta energética se pueda emplear casi por completo. Lo que tiene mucha importancia a la hora del montaje de los sistemas fotovoltaicos pues las sombras incidentes sobre ellos causan daños significativos”.

### 1.3 Generalidades de los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

#### Sistemas fotovoltaicos aislados

“Las posibles configuraciones de los sistemas fotovoltaicos autónomos pueden abarcar desde sistemas simples, tales como un generador FV operando un consumo de corriente directa (DC), hasta sistemas con almacenamiento y consumos en DC o en DC+AC. La incorporación de un convertidor en el sistema fotovoltaico posibilita la utilización de consumos en corriente alterna (AC), tiene como efecto, además, una disminución del rendimiento del sistema a potencias inferiores a la potencia nominal del convertidor. Pueden operar también, en combinación con otras fuentes de energía como los sistemas eólico-fotovoltaicos o eólico-diésel-fotovoltaicos, para formar sistemas autónomos híbridos” (Vidal, 2017).

Estos sistemas se utilizan en la generación de energía en lugares donde no se pueda brindar servicio por el Sistema Energético Nacional por lo que trabajan aislados de la red, como se muestra en la figura 1.1.



**Fig.1.1- Instalación SFV para una vivienda aislada.**

Se puede realizar una clasificación de los SFV autónomos en función de su aplicación como:

- Sistemas de electrificación (principalmente iluminación y electrodomésticos).
- Sistemas profesionales (En las telecomunicaciones, sistemas de navegación).
- Sistemas agrícolas (bombas de agua).

#### 1.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos funcionan por el efecto fotoeléctrico. Las células fotovoltaicas están compuestas por dos delgadas láminas de silicio. Una dopada con elementos de menos electrones de valencia que el silicio, denominada P y otra con

elementos con más electrones que los átomos de silicio, denominada N. Los fotones procedentes de la fuente luminosa, que presentan energía adecuada, inciden sobre la superficie de la capa P, y al interactuar con el material liberan electrones de los átomos de silicio los cuales, en movimiento, atraviesan la capa de semiconductor, pero no pueden volver. La capa N adquiere una diferencia de potencial respecto a la P. Si se conectan unos conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un dispositivo o elemento eléctrico consumidor de energía que, usualmente y de forma genérica se denomina carga, se iniciará una corriente eléctrica continua. La célula solar es usualmente fabricada de silicio y configurada como una gran área de unión p-n.

El campo eléctrico establecido a través de la creación de la unión p -n crea un diodo que permite el flujo de corriente en un solo sentido a través de dicha unión. Los electrones pueden pasar del lado de tipo n hacia el interior del lado p, y los huecos pueden pasar del lado de tipo p hacia el lado de tipo n. Esta región donde los electrones se han difundido en la unión se llama región de agotamiento porque no contiene nada más que algunos portadores de carga móviles. Es también conocida como la región de espacio de cargas.



**Fig. 1.2- Fotografía de una planta fotovoltaica: Amanecer Solar CAP, 100 MW (Chile).**

Las instalaciones fotovoltaicas se agrupan en dos grandes grupos en función del objeto de la misma y por tanto de su configuración:

- Instalaciones FV aisladas.
- Instalaciones FV de conexión a la red eléctrica.

### 1.3.2 Efectos de la irradiancia

La tensión y corriente generada en una célula depende directamente de la iluminación recibida. La corriente de cortocircuito de la célula es directamente proporcional a la irradiancia, como se muestra en la figura siguiente, disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de circuito abierto varía poco con la irradiancia, aunque también decrece, a efectos prácticos se puede considerar constante.

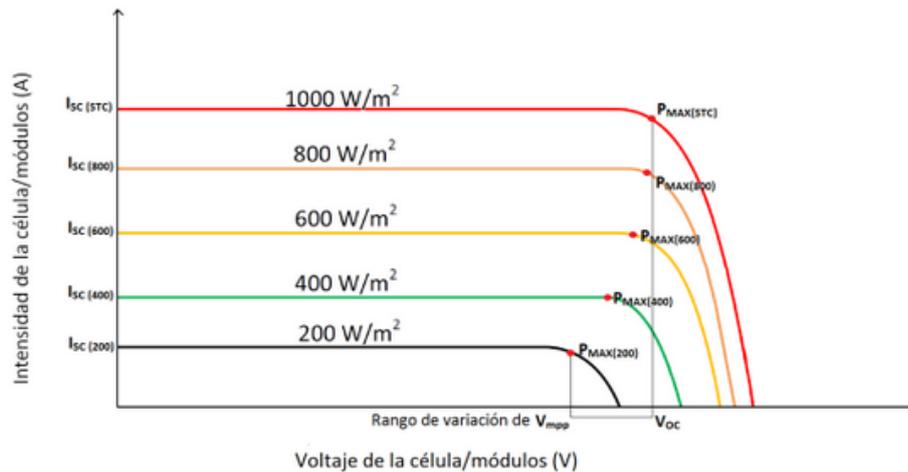


Fig.1.3 Efecto de la irradiancia en los módulos fotovoltaicos.

La intensidad de cortocircuito,  $I_{sc}$ , varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal acorde a la siguiente expresión :

$$I_{sc}(G) = G \frac{I_{sc}(CEM)}{1000} \quad (1.1)$$

Donde :

$I_{sc}(G)$ : intensidad de cortocircuito para una irradiancia  $G$  (A)

$I_{sc}(STC)$ : intensidad de cortocircuito en condiciones CEM (A)

$G$ : irradiancia ( $W/m^2$ )

### 1.3.3 Componentes del sistema Fotovoltaico Autónomo

#### 1.3.3.1 Baterías

Constituyen una tecnología de almacenamiento de energía. En la actualidad, continúan expandiendo su horizonte hacia el almacenamiento de energía en los sistemas de generación mediante fuentes renovables. En un sistema fotovoltaico, la energía depende de la intensidad de la radiación solar, en días nublados disminuye considerablemente y, en estos casos, o durante la noche, se requiere el uso de baterías para almacenar energía y disponer de un sistema que mantenga la alimentación de las cargas cuando el sistema fotovoltaico se desconecte o disminuya su potencia. (Ver figura 1.4)



Fig.1.4- Batería AGM POWER 260Ah.

Doble conversión de energía:

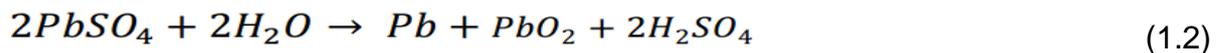
Comenzaremos con una pregunta básica: ¿cuál es el mecanismo que permite la utilización de una batería como una fuente portátil de energía eléctrica? La respuesta es: una doble conversión de energía, llevada a cabo mediante el uso de un proceso electro-químico. La primera conversión, energía eléctrica en energía química, toma lugar durante el proceso de carga. La segunda, energía química en eléctrica, ocurre cuando la batería es descargada. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo se necesitan dos electrodos metálicos inmersos en un medio que los vincule, llamado electrolito.

Proceso de carga:

El voltaje proporcionado por una batería de acumulación es de Corriente Directa (CD). Para cargarla se necesita un generador de CD, el que deberá ser conectado con la polaridad correcta: positivo del generador al positivo de batería y negativo del generador al negativo de batería. Para poder forzar una corriente de carga el voltaje deberá ser algo superior al de la batería.

La corriente de carga provoca reacciones químicas en los electrodos, las que continúan mientras el generador sea capaz de mantener esa corriente, o el electrolito sea incapaz de mantener estas reacciones.

En este caso el sulfato de plomo de los electrodos se transforma en plomo en el electrodo negativo y en óxido de plomo en el positivo como se muestra en la ecuación (1.2).



Proceso de descarga:

El proceso es reversible si desconectamos el generador y conectamos una carga eléctrica a la batería, circulará una corriente a través de ésta, en dirección opuesta a la de carga, provocando reacciones químicas en los electrodos que vuelven el sistema a su condición inicial.

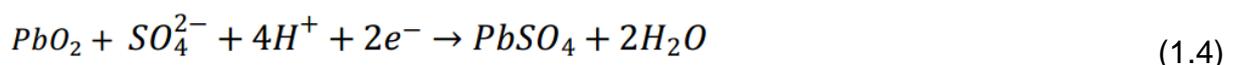
Durante la descarga, en el electrodo de plomo se produce la reacción descrita en la ecuación (1.3):



Cuando los iones sulfato del electrolito se aproximan a los átomos neutros de plomo lo ionizan positivamente haciendo que pierda dos electrones, que van a quedar dentro del electrodo. El ión sulfato (-2), atrae electrostáticamente al ion Pb (+2) y forman una molécula de sulfato de plomo (SO<sub>4</sub>Pb), mediante un enlace iónico entre ambos.

El resultado es que se forma una capa de sulfato de plomo sobre la superficie del electrodo de plomo y que los electrones que se liberan en el interior del plomo, hacen que este electrodo resulte negativo, este proceso se muestra en la ecuación (1.4).

En el caso del electrodo de óxido de plomo es:



Los iones cargados de sulfato (-2) e hidrógeno (+) se aproximan a la molécula de dióxido de plomo (netamente descargada), ionizándola, dando dos iones O (-2), que se unirán con iones de H(+), dando dos moléculas de agua y un ión Pb (+4), al que le sobra carga positiva para unirse con el ión SO<sub>4</sub> (-2), es decir, necesitará extraer dos electrones del electrodo para ser compatible y resultar Pb(+2), pudiendo así

unirse mediante un enlace electrostático (iónico). Al ser extraídos estos dos electrones del electrodo, este queda con una carencia de dos electrones, o sea dos huecos positivos. Por tanto el electrodo queda cargado positivamente.

Circuito abierto/autodescarga:

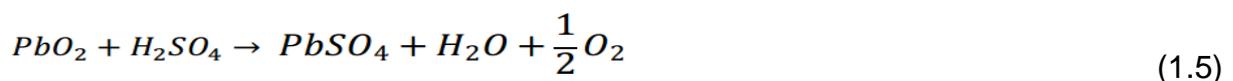
Cuando la batería se encuentra en circuito abierto la batería no absorbe ni suministra corriente.

En este estado, el plomo y el óxido de plomo son inestables termodinámicamente la disolución de ácido sulfúrico, por lo que la materia activa de los electrodos reacciona con el electrolito. Este fenómeno es conocido como autodescarga.

La autodescarga se ve influenciada principalmente por dos factores: la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura.

A continuación se muestran en las ecuaciones (1.5) y (1.6) las reacciones producidas en los electrodos:

1. Electrodo positivo



2. Electrodo negativo



Típicamente en baterías plomo-ácido de calidad la autodescarga suele encontrarse en torno a un 3% mensual.

Profundidad de descarga:

La profundidad de descarga (PD) representa la cantidad de energía que puede extraerse de una batería. Cuanto mayor sea la profundidad de descarga, mayor será la cantidad de materia activa que se transforma pudiendo provocar el desprendimiento del material activo con la consiguiente pérdida de su capacidad. Grandes ritmos de descarga incrementan la capacidad disponible de la batería pero acortan su vida debido a la penetración más profunda del ácido dentro las placas. (Alabart, 2006).

En el anexo #1 se recoge la dependencia del número de ciclos esperados con la profundidad de descarga para una batería de ciclo poco profundo y una batería ciclo profundo.

Voltaje de salida de una batería:

El voltaje de salida de una batería de Pb-ácido no permanece constante durante la carga o descarga. Dos variables determinan su valor: el estado de carga y la temperatura del electrolito. Para comprender el efecto que tiene la temperatura en el comportamiento de la batería es útil recordar que cualquier reacción química es acelerada cuando la temperatura se incrementa y es retardada cuando ésta disminuye.

Temperaturas elevadas:

Si las bajas temperaturas causan tantos problemas, algún lector puede concluir que las temperaturas ambientes elevadas son las ideales. La conclusión es errónea, pues la mayor actividad química se traduce en una reducción en la vida útil de una batería de Pb-ácido, Ver anexo #2.

Gasificación:

Cuando una batería de plomo-ácido está próxima a alcanzar el 100% de su carga, la cantidad de agua en el electrolito ha sido severamente reducida. Los iones que ésta provee se hacen más escasos, disminuyendo la posibilidad para el ión de hidrógeno (electrodo negativo) y para el ión de oxígeno (electrodo positivo) de reaccionar químicamente, formando plomo y dióxido de plomo, respectivamente. Si la corriente de carga continúa al mismo nivel, el exceso de gases escapa del electrolito produciendo un intenso burbujeo, el que se conoce como “gasificación”. Si el proceso de carga no es controlado, el exceso de oxígeno comienza a oxidar los sostenes de plomo de las celdas, pudiendo causar el derrumbe de los mismos. Este fenómeno es conocido como la “muerte súbita” de la batería, ya que ocurre sin dar aviso previo. El proceso de carga de una batería de Pb-ácido debe minimizar la gasificación del electrolito. Algo de gasificación es útil, pues contribuye a homogeneizar la solución electrolítica. Para una batería solar de Pb-ácido de 12V nominales, trabajando alrededor de los 25°C, un voltaje de carga de 14,28V proporciona un nivel tolerable de gasificación. Un voltaje más elevado provoca un nivel de gasificación excesivo.

### **1.3.3.2 Regulador de carga**

Para un correcto funcionamiento de la instalación, hay que instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobre descarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil. El regulador

trabaja por tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería dado que los módulos solares tienen una tensión nominal mayor que la de la batería, si no existiera regulador se podrían producir sobrecargas. (Cruz, 2017).



**Fig.1.5-Regulador de carga para sistemas fotovoltaicos. (cortesía blue solar)**

Función:

Para preservar la vida de las baterías, hay que evitar las situaciones de sobrecarga (que corresponde a un voltaje excesivamente elevado) y de descarga profunda. En el caso de baterías de plomo-ácido, el voltaje y el estado de carga están directamente relacionados, por lo que la medida de la tensión en bornes del acumulador proporciona una buena indicación sobre si la batería está o no trabajando con un régimen de carga adecuado.

Hay dos tipos de controles: regulador de carga y controlador de descarga, que protegen las baterías contra sobrecarga y contra sobredescargas, respectivamente. Algunos fabricantes integran las dos funciones de protección de las baterías en un solo dispositivo que se denomina "regulador con control de carga" o "regulador con LVD". Estos reguladores con control de carga son particularmente útiles en sistemas pequeños con cargas de corriente continua solamente. Puede ser difícil encontrar un regulador de este tipo con suficiente capacidad de salida para operar todas las cargas simultáneamente o para permitir el arranque de ciertos aparatos como televisores. En estos casos es necesario instalar un regulador de recarga y un controlador de descarga separados.

En resumen, obtenemos que las funciones básicas del regulador son:

- Carga óptima de la batería.
- Impedir que la descarga supere los límites admisibles.
- Evitar sobrecargas.

Y las funciones complementarias son:

- Informar sobre tensiones y corrientes de carga, descarga y dar alarmas.
- Conectar y desconectar cargas según prioridades.
- Llevar un control del consumo.

Tipos de reguladores:

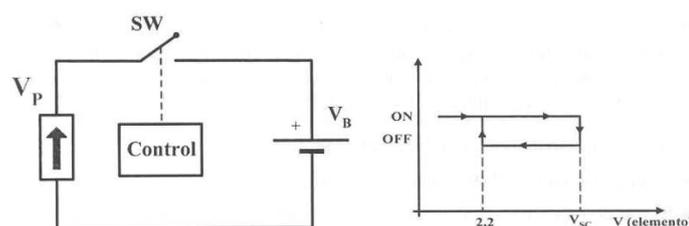
Según dónde se ubique existen dos formas de trabajo para el Control de Carga (CdC): control en serie y control en paralelo. Presentándose dos tipos de regulador:

- Regulador paralelo: Se encarga de disipar el exceso de potencia generado por los módulos.
- Regulador serie: Desconecta la batería del generador.

Regulador serie:

En esta versión, la acción de control tiene lugar en serie con el circuito de carga, abriéndolo y cerrándolo intermitentemente, dependiendo del voltaje de la batería. Durante la noche, el circuito de carga permanece abierto, evitando que las baterías se descarguen a través de los mismos (diodo N-P polarizado por el voltaje de la batería para no conducir)

El regulador serie que se muestra en la Figura 1.6 se utiliza con potencias elevadas, ya que es más cómodo desconectar la batería del generador mediante un interruptor accionado según el ciclo de histéresis representado en la figura adjunta. El valor recomendado para  $V_{sc}$  es de ,2.45V por elemento de batería, a 25°C y debe corregirse a razón de -5mV/°C.



**Fig.1.6 Esquema del regulador serie.**

Dentro de esta configuración pueden distinguirse varias técnicas de control:

- Control serie on-off: dicho control actúa desconectando el generador del acumulador cuando la tensión en carga alcanza cierto valor, evitando así la sobredescargas de las baterías.
  
- Control serie, dos estados: similar al anterior, excepto que la regulación de la tensión final de carga ocurre a dos tensiones; inicialmente una tensión elevada de ecualización y después una tensión de flotación, lo que permite un gaseo periódico de la batería.
  
- Control serie lineal: en el que se aplica una tensión constante a partir de que la batería alcanza la tensión de corte por sobrecarga, utilizando un elemento de control serie que actúa como una resistencia variable que disipa el excedente energético que no usa para la carga de la batería.
  
- Control serie PWM: en el que se conecta y desconecta el generador FV dando lugar a pulsos de corriente de carga en los que se varía su ciclo de trabajo de modo que la batería mantenga una tensión constante de carga.
  
- Control serie multietapa: generalmente se utiliza en grandes sistemas, en los que el generador FV completo se divide en varios generadores que se conectan o desconectan gradualmente para decrecer la corriente de carga cuando está cerca de la plena carga.

### **1.3.3.3 Inversor**

Es un elemento fundamental en un sistema fotovoltaico aislado. Se trata de un dispositivo electrónico de potencia que se conecta directamente al generador fotovoltaico, en su parte de corriente directa (DC), y a la carga eléctrica, en su parte de corriente alterna (AC). Su objetivo es transformar la energía continua, producida por el generador fotovoltaico, en energía alterna, esta tiene que estar perfectamente sincronizada con la red existente, ya sea de alta, media o baja tensión. Su funcionamiento está basado en semiconductores de potencia con un ciclo controlado de apertura y cierre que generan ondas de pulsos variables, cuantos más pulsos menor distorsión armónica y mayor proximidad a la onda pura sinusoidal.

Los convertidores empleados en las aplicaciones fotovoltaicas se pueden agrupar o dividir en dos grandes categorías: los auto-conmutados y los conmutados por la red.

Los convertidores auto-conmutados pueden funcionar como fuente de corriente o como fuente de tensión, mientras que los conmutados por la red solo lo hacen como fuente de corriente. Por ello, los auto-conmutados se pueden utilizar tanto en aplicaciones autónomas como en aplicaciones conectadas a la red eléctrica, mientras que los conmutados por la red únicamente en aplicaciones conectadas a la red.



**Fig.1.7 Inversor fotovoltaico conectado a la red eléctrica. (Cortesía victron energy)**

Su ubicación es muy importante y debe estar climatizado, normalmente se consigue mediante un ventilador, pues los que enfrían por convección se calientan mucho. Si la temperatura donde se encuentra el convertidor es demasiado cálida, perjudica gravemente el rendimiento de la instalación. La vida útil media de este componente está alrededor de los 20 años. Los fabricantes proporcionan las características del convertidor mediante sus hojas técnicas. Estas sirven para poder comparar los distintos modelos y así poder diseñar mejor una instalación. En ellas se pueden encontrar parámetros comunes como el rango de potencia, tensión y corriente máxima, que no podrán ser superados para no dañar el equipo, así como los valores de funcionamiento, frecuencia y tensión nominal.

Entre otras prestaciones, el convertidor debe ser capaz de:

- Operar en un amplio rango de tensión DC de entrada.
- Poseer autoprotecciones y seguridad al usuario.
- Regular la tensión y la frecuencia de salida.
- Proporcionar potencia AC a las cargas eléctricas con buena calidad de suministro.
- Realizar el seguimiento del punto de máxima potencia si está directamente conectado al generador fotovoltaico.
- Operar en un amplio rango de condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.

- Poseer interfaces con otros controles del sistema, o controlar el sistema.
- Satisfacer las necesidades de seguridad exigidas por la carga.

Para optimizar el grado de aprovechamiento del generador, los convertidores deben seguir el punto de máxima potencia (mediante algoritmos que controlen la tensión de operación del generador fotovoltaico). Además, deben trabajar con el máximo rendimiento, generando energía con buena calidad (baja distorsión armónica, bajas interferencias electromagnéticas) y cumplir las normas de seguridad necesarias tanto para personas, equipos como para la red eléctrica.

#### 1.3.3.4 Carga

Las cargas constituyen la parte determinante de los SFV, pues a partir de sus características y requerimientos puede realizarse el diseño del sistema que a su vez puede dar lugar a una reelección o ajuste de la selección inicial de dichas cargas. Estas utilizan la energía eléctrica producida por los generadores y que pueden adoptar muchas formas: equipos CC (iluminación, televisión, enlaces de telecomunicación), equipos CA (motores eléctricos, iluminación), a continuación mostramos algunos de estos equipos. Ver Figura 1.8.



Fig.1.8- Luminaria fluorescente para sistemas fotovoltaicos aislados.

#### 1.3.4 Ejemplo de un sistema Fotovoltaico en Cuba

Energía solar fotovoltaica en Cuba:

Las primeras experiencias en Cuba de integración de la energía solar han estado unidas a proyectos de electrificación rural. Desde finales de los años 80 y principios de los 90, se comenzó un programa de electrificación rural con el objetivo de llevar electricidad a todas las regiones rurales, montañosas y de difícil acceso, con la intención de mejorar la calidad de vida de sus habitantes, sobre todo se alimentaron las instalaciones escolares y los centros de salud. La energía solar se ha utilizado en todo el planeta para este tipo de proyectos, demostrando una alta capacidad y adaptación para cubrir las necesidades de estas poblaciones de una forma económica. El uso de fuentes renovables reduce la presión de las comunidades

sobre el ecosistema, la deforestación que provoca el uso masivo de la leña, por ejemplo, y mejora las condiciones de salud, evitando el humo de la combustión de la leña.

Cuba está dando pasos firmes hacia la independencia energética. Por ello, está implementando una serie de iniciativas que son una apuesta al futuro en la isla para contrarrestar los problemas de falta de petróleo y el perjuicio que su pago supone para la economía del país. En la figura 1.9 se muestra una foto como ejemplo del desarrollo fotovoltaico. Cuba posee hoy, en su matriz energética, un 4,3% de generación proveniente de fuentes renovables de energía, y las expectativas son llegar a cubrir, como mínimo, un 24% con fuentes de energía limpias para el año 2030. En este plan se incluyen la sincronización al sistema electroenergético nacional de, al menos, 700 MW de energía solar fotovoltaica, considerando, como se muestra en la figura 1.9, el buen aprovechamiento de los niveles de irradiancia existentes en nuestro país en todas las épocas del año.

Cuba se caracteriza por tener una buena radiación solar promedio de alrededor de más de  $5\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$ , con una variabilidad aproximada de  $\pm 10\%$  a lo largo y ancho de la isla, aspecto muy positivo, a diferencia de otras latitudes mayores. La componente directa de la radiación está entre un 65% y 80%, siendo la componente difusa relativamente alta, lo que enriquece el espectro solar en las longitudes de onda.

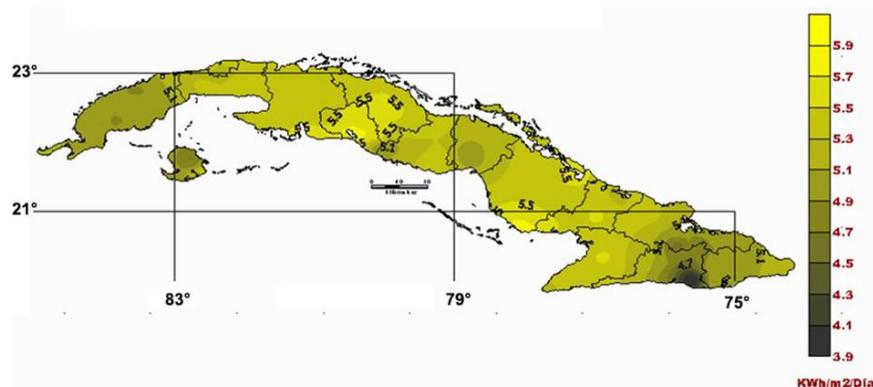


Fig.1.9- Mapa de la productividad en el territorio de cubano.

#### 1.3.4.1 Módulos que produce Cuba

El Combinado Ernesto Guevara, donde radica la única planta cubana de paneles solares, diversifica sus producciones con la reapertura de la línea dedicada a la obtención de fuentes de respaldo energético para computadoras. Con una capacidad de 100 mil unidades anuales, en la instalación se terminarán este año cerca de 20 mil para suplir necesidades del país en el ámbito de la informatización.



Fig.1.10- Combinado Ernesto Che Guevara.

Luego de mejoras en la industria -sin par en Cuba-, fue posible reiniciar en 2014 la producción de dichos sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), con calidad óptima.

Paralelamente el combinado confecciona módulos fotovoltaicos de variados formatos para llegar a los 10 megaWatt de potencia al año.

En Cuba pueden verse en consultas de rehabilitación, escuelas serranas y salas de televisión, programa destinado a facilitar la electrificación en sitios rurales apartados o de difícil acceso. Puntos de guardabosques utilizan también los paneles pinareños, además de centros de acopio, donde los pescadores conservan los peces capturados.

Otra de las proyecciones es la fabricación de sistemas fotovoltaicos, los cuales podrán ser adquiridos por la población para fines domésticos.

#### **1.3.4.2 Módulos que se fabrican en Pinar del Rio**

En la empresa de Componentes electrónicos Ernesto Che Guevara se fabrican varios tipos de módulos fotovoltaicos entre los que se encuentran:

- El módulo fotovoltaico serie DSM-80-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 80Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-85-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 85Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-90-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 85Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-40 está compuesto por 36 celdas solares formato 62,5mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 40Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-45 está compuesto por 36 celdas solares formato 62,5mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 45Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-130-C está compuesto por 36 celdas solares formato 62,5mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 130Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-140-C está compuesto por 36 celdas solares formato 62,5mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 140Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-170-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 170Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.

- El módulo fotovoltaico serie DSM-175-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 175Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.
- El módulo fotovoltaico serie DSM-180-C está compuesto por 36 celdas solares formato 125mmx125mm conectadas en serie con una potencia máxima de 180Wp para una irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> a 25°C.

#### **1.4 Fundamentos teóricos del efecto de las sombras en el comportamiento energético del panel fotovoltaico**

A diferencia de otras fuentes de energía, la energía solar requiere un suministro constante de luz para funcionar correctamente, y un panel solar puede verse afectado tanto positiva como negativamente por la presencia de cualquier tipo de sombra. Es evidente que si durante el día un panel solar recibe sombra su productividad disminuye, pero este no es el único efecto de la sombra sobre estos equipos. A continuación se presentan los principales efectos de la sombra en los paneles solares.

- **Pérdidas de potencia.**

Un panel solar se compone por varias celdas solares y todas actúan en conjunto para generar electricidad. Si una parte del panel recibe la sombra de un árbol o cualquier otra superficie la energía se pierde exponencialmente porque cada celda solar afecta a las demás.

- **Inconsistencia de energía.**

Si la productividad de un panel solar baja demasiado debido a la sombra, el sistema que alimenta sufre fluctuaciones de energía, lo cual, puede dañar irremediablemente los accesorios que se utilizan, como el inversor de corriente o la batería.

- **Producción desigual de energía.**

Un panel solar que es afectado por la sombra recolecta energía de forma desigual, lo cual puede dañar los componentes del panel. Sin duda son muchas las razones en cuestión de productividad y dinero que te llevan a asegurarte de que el panel no esté expuesto a ningún tipo de sombra, sin embargo este factor sí puede tener algunos efectos positivos en el equipo.

- **La sombra genera un efecto de enfriamiento**

Cuando un panel solar se enfría, es como si recibiera un tipo de descanso, los conectores de salida regresan a su temperatura normal y el equipo se prepara para volver a trabajar a su máxima capacidad. Esto puede ayudar a aumentar la vida y la productividad del panel, aunque no es precisamente indispensable ya que durante la noche el panel recibe este beneficio. (Pallejá, 2012)

#### 1.4.1 Efectos de los sombreados parciales sobre la instalación fotovoltaica

Todo generador fotovoltaico presenta un punto de trabajo concreto en el que puede traspasar la máxima potencia eléctrica posible; dicho punto se denomina Maximum Power Point (MPP), en español Punto de Máxima Potencia. La magnitud de dicha potencia depende fundamentalmente de la intensidad de la irradiación. Si se proyectan sombras sobre módulos fotovoltaicos concretos de un string dentro del generador fotovoltaico, se modifican significativamente sus propiedades eléctricas: el generador fotovoltaico posee ahora varios puntos de trabajo "satisfactorios" diferenciados. (SMA Solar Technology AG, 2015)

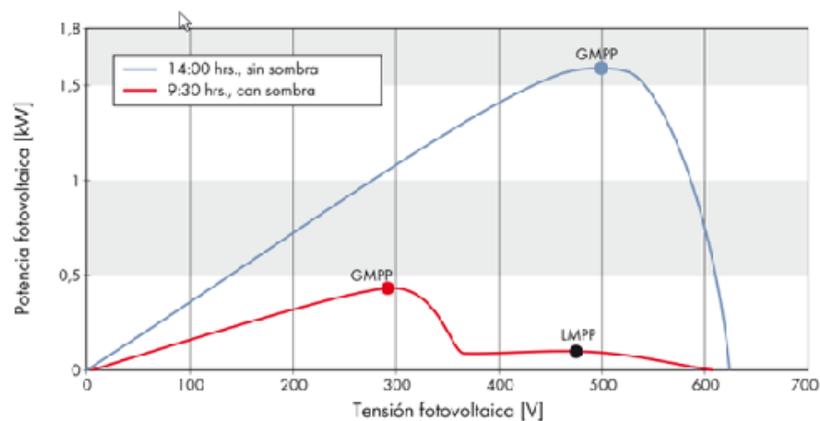


Fig.1.11- Diagrama de potencia/tensión del generador fotovoltaico representado en 2 horas del día diferentes (con o sin sombreado parcial).

La figura 1.11 muestra el diagrama de potencia/tensión del generador fotovoltaico en dos horas del día para dos casos especiales uno con sombras y otro sin esta donde se puede observar en la curva de sombreado dos MPP puntos de máxima potencia. (SMA Solar Technology AG, 2015).

#### 1.4.2 Placas Solares: Caja de conexión y diodos de protección (bypass)

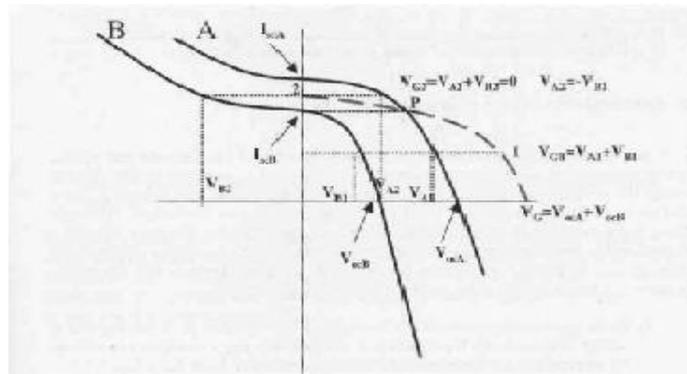
La caja de conexiones de un panel solar se encuentra en la parte posterior de la placa solar, de donde salen los terminales de interconexión. En dicha caja vienen marcados el positivo y negativo del panel y en su interior, protegidos con silicona,

van colocados los diodos de protección (bypass) de los que hablaremos a continuación.

Como ejemplo se muestra a continuación una imagen de la caja de conexiones de los paneles solares SolarWorld, que es una de las más compactas y avanzadas del mercado.

Los diodos de protección que van instalados en la caja de protecciones tienen como objeto el evitar los efectos que se producen por los puntos calientes y sombreados, que pueden afectar negativamente al rendimiento del panel.

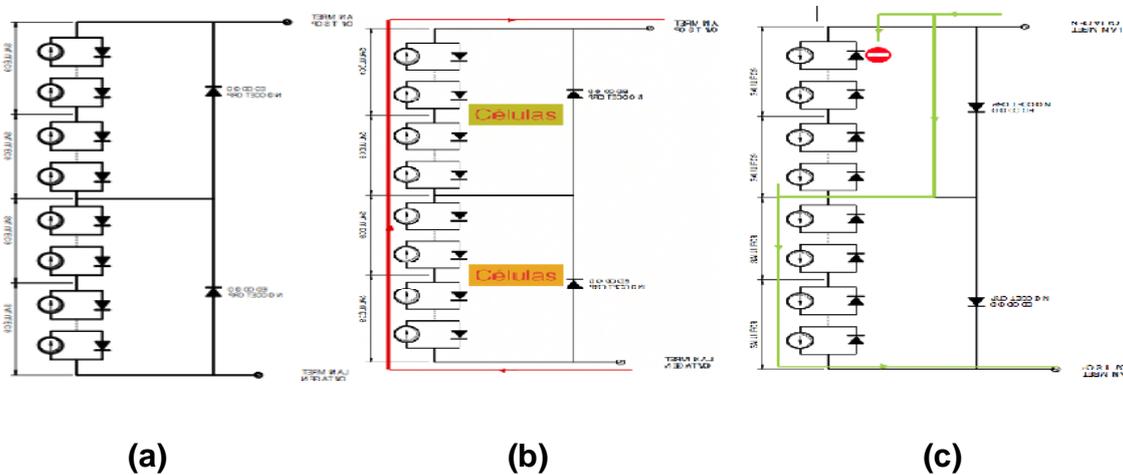
El punto caliente tiene lugar, cuando en una serie de células una tiene un defecto de fabricación ó se encuentra parcialmente sombreada, que es el caso más corriente y con mayor peligro en una instalación de conexión a red o bombeo directo, cuando el número de módulos en serie es elevado. Por ejemplo, en una instalación de conexión a red con 8 módulos en serie, tenemos  $36 \times 8 = 288$  células en serie, o si por ejemplo, en una instalación de bombeo que fueran 17 paneles en serie,  $36 \times 17 = 612$  en serie. Veamos un ejemplo para el caso de dos células, no iguales A y B en serie. El comportamiento de la curva resultante es el siguiente:



**Fig.1.12- Curvas resultante de los diodos de bypass del panel fotovoltaico.**

En el punto correspondiente al voltaje de circuito abierto, la corriente total del generador es igual a cero, y el voltaje resultante  $V_G$  es igual a la suma de los dos voltajes de circuito abierto  $V_{ocA} + V_{ocB}$ . En el punto 1, o en cualquier punto situado entre P y el voltaje de circuito abierto, las dos células operan como generadores, con una corriente  $I_{G1}$  y un voltaje total del generador  $V_G = V_{A1} + V_{A2}$ . El punto P corresponde al límite de la corriente de cortocircuito de la célula de menor eficiencia o sombreada, y el voltaje resultante en este punto será el voltaje de la curva A, ya que la curva B en este punto tiene  $V=0$ . El punto 2 correspondería a la operación en

el voltaje de circuito abierto del generador, donde  $I_G = I_{sc}$  y  $V_{G2} = V_{A2} + V_{A1} = 0$ . Para que esto se cumpla, es decir, que el voltaje del generador sea igual a cero, la célula B se polarizará inversamente hasta adquirir un voltaje  $V_{B2} = -V_{A2}$  actuando consiguientemente como un receptor. Este mismo razonamiento es aplicable para una asociación de células más numerosa, o placas solares conectadas en serie como es nuestro caso. En una situación próxima a la de cortocircuito, haría que la célula sombreada tuviera que disipar una potencia elevada igual a la generada por el resto de células, calentándose y produciéndose sobre ella el fenómeno del punto caliente. Para evitar una disipación de potencia que pudiera elevar la temperatura hasta el punto de deteriorar la célula, se recurre a la inserción de los diodos de paso en paralelo con una rama de células conectadas en serie.



**Fig.1.13-** (a) Esquema de conexión de las células solares, (b) camino de la corriente en régimen normal, (c) camino de la corriente con es sombreado de una de las celdas.

Cuando un módulo está generando la circulación de corriente es la indicada con el camino rojo Mostrado en la figura (b). Si una célula esta sombreada se comporta como un diodo y el camino será el la figura (c), Como se puede ver, este es el motivo de instalar los diodos para la protección contra sombras, la menor resistencia al paso de la corriente la ofrece el diodo y no la célula que es un diodo polarizado de forma inversa.



**Fig.1.14- Caja de conexión con diodos, en placas solares.**

Como caso real, mostramos una foto de 2 diodos de protección (bypass) de una caja de conexiones típica en placas solares. En este caso son 2 diodos, 1 por cada 18 células: (Departamento Técnico de SunFields Europe, 2016)

Se debe destacar que los módulos están compuestos por cuatro hileras de 9 celdas fotovoltaicas conectadas en serie. Entre ellas se encuentra conectado en paralelo dos diodos de bypass o de (libre camino). Este componente electrónico permite el flujo de corriente en un solo sentido, por lo que protege cada una de las cadenas de posibles daños ocasionados por las sombras parciales. La protección de cada una de las cadenas viene dada pues el diodo impide que cada cadena de células absorba corriente de otra cadena en un mismo módulo, se producen sombras en alguna de ellas. La colocación de estos diodos puede variar según marca o modelo del módulo fotovoltaico. Según la configuración de dichos diodos puede variar mucho el efecto del sombreado parcial en la potencia del panel. Más adelante veremos cómo afecta esta configuración a las curvas I-V y P-V.

#### **1.4.2.1 Influencia de las sombras según la configuración de los diodos de bypass**

Como hemos visto, la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico se ve afectada por las sombras, dependiendo del área sombreada y la radiación recibida en dicha área. Otro factor importante que determina la afectación de las sombras en el módulo fotovoltaico, y por lo tanto, la curva característica I-V, es la configuración de las conexiones eléctricas entre las células y los diodos de bypass. Los diodos de bypass están instalados en los módulos para prevenir el consumo de energía cuando las células están sombradas o dañadas, estos diodos también tienen la función de prevenir que las células no trabajen cerca de la zona de avalancha.

Efecto avalancha (diodos poco dopados).

“En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación; si la tensión inversa es elevada los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez. El resultado es una avalancha de electrones que provoca una corriente grande. Este fenómeno se produce para valores de la tensión superiores a 6 V. El siguiente estudio se examina el desempeño de un generador fotovoltaico. Un generador fotovoltaico consiste en módulos conectados entre sí. En particular, los diodos de bypass de superposición son analizados, mostrando que total o parcialmente, los módulos sombreados pueden consumir parte de la energía generada por otros módulos del generador fotovoltaico. Este efecto está también presente en generadores fotovoltaicos de baja potencia. En estos casos la potencia disipada por el diodo es pequeña, pero si hay muchos, la potencia disipada por todos los diodos puede ser comparable con la energía producida por varios módulos fotovoltaicos”. (Pallejá, 2012).

En este caso vamos a estudiar el comportamiento individual de un módulo fotovoltaico con sombras.

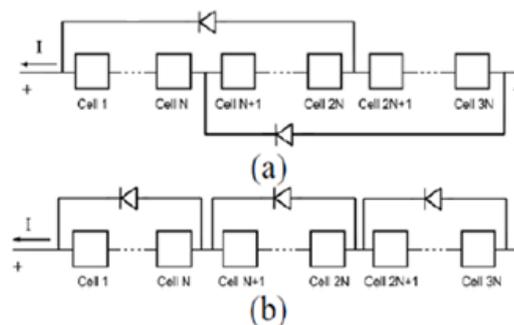


Fig.1.15- Diodo de bypass superpuesto (a); no superpuesto (b).

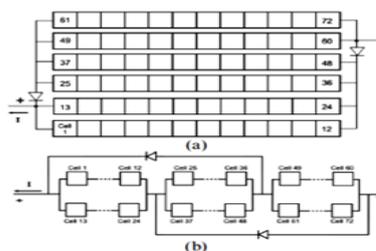
### 1.4.2.2 Comportamiento de un módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células fotovoltaicas y por diodos de bypass conectados en paralelo. La configuración de las conexiones determina la curva I-V del módulo fotovoltaico cuando este está parcialmente sombreado. En el siguiente estudio, la composición del módulo fotovoltaico consiste en 72 células distribuidas en 6 filas compuestas por 12 células cada una, con las siguientes configuraciones:

1. Diodos de bypass superpuestos
2. Diodos de bypass no-superpuestos

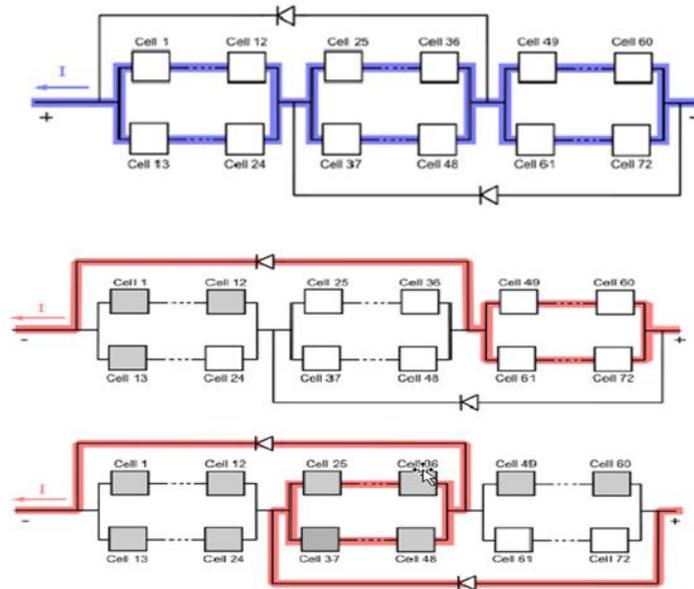
Diodos de bypass superpuestos:

En la primera configuración analizada, cada módulo se compone de 72 células conectadas con los diodos de bypass superpuestos (Figura 1.16)



**Fig.1.16- Módulo fotovoltaico (a) la distribución física (b) sistema eléctrico con diodos solapados.**

Con el fin de estudiar el comportamiento típico de los módulos fotovoltaicos, una simulación de sombra progresiva se hará a partir de la fila inferior de las células fotovoltaicas a la superior. Este es un enfoque práctico, ya que en los amaneceres y puestas de sol pueden ocurrir situaciones en las que el módulo fotovoltaico tiene la misma sombra que la simulada. Hay tres posibles caminos para la mayor parte de la corriente eléctrica. La ruta depende de los diodos polarizados, y el diodo de polarización depende de las células fotovoltaicas sombreadas. Cuando ambos diodos están polarizados, las dos series centrales del módulo son los responsables de un notable poder de drenaje. Cada uno de estos caminos es un punto de la curva I-V y P-V. (Fig 1.17).



**Fig.1.17- Trayectorias Corrientes eléctricas en los módulos fotovoltaicos con diodos de derivación superpuesta.**

### 1.4.3 Sombra: Una tarea especial para el inversor

Todo inversor fotovoltaico dispone del denominado seguidor del punto de máxima potencia (MPP). Este permite que el generador fotovoltaico siempre funcione en su punto de trabajo óptimo. Controlado de esta forma, el generador fotovoltaico puede aprovechar de forma óptima la potencia disponible para una determinada radiación solar. En los inversores SMA dicha tarea la desempeña la gestión operativa OptiTrac, garantizando con ello el máximo rendimiento energético. Sin embargo, tal como se ha descrito anteriormente, la sombra proyectada sobre determinados módulos fotovoltaicos provoca que se generen dos puntos de trabajo diferentes, el inversor conectado debe decidir con cuál de estos dos puntos de trabajo, el MPP local (LMPP) o el MPP global (GMPP), debe funcionar el generador fotovoltaico. Pero dado que los seguidores de máxima potencia (MPP) convencionales únicamente contemplan el rango próximo del punto de trabajo actual, para no perder energía innecesariamente durante el seguimiento en ocasiones no se percibe un punto de trabajo alternativo. La potencia instantánea de la instalación fotovoltaica puede ser, por tanto, claramente inferior a la que debería en razón de la sombra proyectada. (SMA Solar Technology AG, 2015).

Planificación de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas con este procedimiento son inevitables las pérdidas durante el proceso de búsqueda. Aun así, el *OptiTrac Global Peak* es un procedimiento de búsqueda especializado en mantener las pérdidas debidas a la búsqueda de un segundo máximo de potencia

ocasional en un valor máximo del 0,2 % en momentos en los que no haya sombras. Para hacer que las pérdidas debidas a la búsqueda aún sean menores, en determinados casos en los que la sombra surge y evoluciona lentamente en la instalación fotovoltaica, es razonable adaptar individualmente la frecuencia de los procesos de búsqueda (tiempo del ciclo), reduciendo dicha frecuencia. Planificación de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas para que no se vea afectada negativamente la rentabilidad en instalaciones fotovoltaicas sombreadas temporalmente, hay que minimizar las pérdidas de rendimiento condicionadas por las sombras, ya desde la misma fase de planificación. Como orientaciones de ayuda para el planificador de la instalación se enumeran las siguientes reglas de planificación más relevantes.

Elección de la superficie del tejado, la minimización de las pérdidas energéticas con *strings* de módulos parcialmente sombreados se basa siempre en poner el inversor en condiciones de sortear eléctricamente las células solares sombreadas y, de este modo, aprovechar de forma óptima los módulos fotovoltaicos del mismo string no sombreados y conectados en serie con las células solares sombreadas. La potencia aun así reducida de las células solares sombreadas no se puede aprovechar en dicho momento. Al elegir la superficie del tejado para una instalación solar debería garantizarse por ello que no se originen sombras duraderas y, especialmente en las horas de máxima irradiación (mediodía, meses de verano), que no incida sobre el generador fotovoltaico ninguna sombra, en la medida de lo posible. Para estimar las características de las sombras en cuestión, tales como el tamaño y la variación de éstas a lo largo de un año, se pueden utilizar programas especiales de simulación. (*SMA Solar Technology AG, 2015*)

Planificación de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas. Elección de la sombra en la instalación. La sombra proyectada sobre el generador fotovoltaico influye considerablemente sobre el rendimiento energético alcanzable.

El análisis de la evolución de las sombras siempre debe considerarse al iniciarse el diseño de una instalación. La proporción de módulos fotovoltaicos sombreados en relación con el generador total y la evolución temporal de las sombras son características importantes de una instalación fotovoltaica con sombreado parcial. Las siguientes recomendaciones de manejo son importantes a la hora de considerar el diseño de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas: Con una sombra sobre tan sólo algunos módulos fotovoltaicos o sobre una proporción reducida de los mismos (por ejemplo, el 10 % del número total), se puede repartir la sombra de

modo uniforme por los distintos strings. Como la tensión MPP se encuentra siempre en estos casos en el rango cercano de la tensión MPP nominal, no se requiere ninguna gestión operativa (*OptiTrac Global Peak*) especial. En caso de un intenso sombreado, es aconsejable un funcionamiento por separado de los módulos fotovoltaicos sombreados y sin sombrear. En este caso es válido: Agrupar las partes del generador con un nivel de irradiación similar. No realizar ninguna conexión en paralelo de los strings con un nivel diferente de irradiación, sino prever un seguidor del punto de máxima potencia (MPP) separado para cada string. Para ello se pueden emplear muchos inversores pequeños o aquellos dotados de la denominada técnica Multi-String. Para maximizar el rendimiento energético se requiere el *OptiTrac Global Peak*.

Aun así, en el caso del sombreado mínimo descrito anteriormente, la concentración de los módulos fotovoltaicos sombreados dotados de su propio seguidor del punto de máxima potencia (MPP) representa una alternativa a la distribución uniforme de la sombra en todos los strings. Incluso en el caso de este diseño de la instalación se requiere emplear el *OptiTrac Global Peak* para minimizar las pérdidas de rendimiento. Elección de los inversores tal como se ha descrito en el apartado "Gestión de sombras", la elección del inversor también influye sobre las pérdidas de rendimiento condicionadas por el sombreado. A la hora de elegir el inversor deben tenerse en cuenta tres puntos: Los inversores con un gran rango de tensión de entrada también pueden seguir ajustando el punto de trabajo óptimo incluso habiendo sombras y produciéndose la disminución resultante correspondiente de la tensión MPP. Los inversores con regulación de strings individuales permiten el funcionamiento casi en el punto óptimo de un generador fotovoltaico parcialmente sombreado y reducen gran parte de las posibles pérdidas. Para mantener al mínimo las pérdidas de rendimiento condicionadas por las sombras, es preciso emplear un inversor para los strings parcialmente sombreados cuyo seguimiento del punto máximo de potencia (MPP) detecte la existencia de varios puntos de trabajo. (*SMA Solar Technology AG, 2015*)

### 1.5 Instalación (Ver anexo #9)

Para la instalación de los sistemas fotovoltaicos autónomos se debe de cumplir las siguientes normativas de instalación:

- La batería debe estar ubicada en un espacio bien ventilado y con acceso restringido.
- Deben tomarse precauciones para evitar el cortocircuito accidental de los terminales de la batería.
- El generador fotovoltaico debe estar totalmente libre de sombras durante por lo menos 8 horas diarias, centradas al mediodía, y a lo largo de todo el año.
- Todos los materiales necesarios para la instalación (tornillos, conectores, etc.) deben estar debidamente seleccionados.
- El diseño de las estructuras de soporte debe facilitar la limpieza de los módulos fotovoltaicos y la inspección de las cajas de conexión.
- El montaje de las estructuras de soporte debe preservar su resistencia a la fatiga, corrosión y efectos del viento.
- Si se permite el montaje en los tejados, deberá haber una separación de, por lo menos, 5 cm entre los módulos y el tejado o cubierta para permitir la circulación de aire.
- Si se permite el montaje en los tejados, las estructuras de soporte no deberán fijarse a las tejas o a las chapas, sino a las vigas del tejado u otro elemento de la estructura de la vivienda.
- Los reguladores de carga y las lámparas deben suministrarse con elementos de soporte y fijación adecuados para su montaje (la instalación debe ser relativamente simple).
- El diseño de luminarias y reguladores de carga debe permitir el acceso con cierta facilidad a los fusibles y terminales de cables.
- La necesidad de herramientas debe minimizarse. (evitando tuercas de diferente tamaño / distintos tamaños de tornillos, etc.).
- Si están montados en superficie, los cables deben graparse a las paredes, a intervalos adecuados, para asegurar suposición vertical y horizontal. De no ser así, deben embutirse en las paredes y recubrirse con yeso o similar.
- Los cables deben asegurarse a las estructuras de soporte o a las paredes, para evitar esfuerzos mecánicos sobre otros elementos de la instalación eléctrica (cajas de conexión, balastos, interruptores, etc.).

- No se permite la conexión en paralelo de más de dos baterías.
- No se permite la conexión paralelo de baterías diferentes.(Norma Técnica Universal para Sistemas Fotovoltaicos Domésticos)

### **1.6 Conclusiones del capítulo**

En el presente capítulo se realizó una breve caracterización de los distintos componentes que conforman los sistemas fotovoltaicos autónomos, también se plasmaron las condiciones de operación en Cuba, se expusieron las distintas normativas para la instalación de los módulos fotovoltaicos. Además se describieron los fundamentos teóricos en las afectaciones de las sombras y las condiciones ambientales en los paneles solares fotovoltaicos. El estado del arte evidenció, las afectaciones de estas condiciones sobre los mencionados paneles, al mismo tiempo los métodos desarrollados en la comprobación de dichas afectaciones en la eficiencia de los mismos, para ello se consultó diferentes bibliografías actualizadas respecto a los temas expuestos en este capítulo.

## Capítulo 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Introducción

En el presente capítulo se hará una breve caracterización de cada equipo que compone el sistema fotovoltaico autónomo en cuestión, así como de cada instrumento usado en la medición de las diferentes variables eléctricas de interés en el proceso experimental. Se mostrará lo que se va a desarrollar en cada experimento y se plasmará la recopilación de información correspondiente a cada uno de ellos por separado.

### 2.2 Instalación experimental individual

Durante los ensayos de laboratorio fue necesario emplear un conjunto de instrumentos y equipos sin los cuales el cumplimiento de los objetivos trazados sería imposible.

#### 2.2.1 Módulo fotovoltaico de silicio policristalino

El módulo fotovoltaico posee dos paneles fotovoltaicos SW 150 poly R6, para las mediciones de los parámetros característicos se emplearon ambos paneles en paralelo con una potencia total de 300 W.



Fig.2.1- Módulo fotovoltaico SW150 poli R6.

En el anexo #3 se indican algunas de sus características generales, para las “Condiciones Estándar de Medida” (STC).

### 2.2.2 Características eléctricas

La potencia máxima de salida de un panel fotovoltaico es, sin duda alguna, la característica más importante del mismo. Salvo en casos de muy bajo consumo, la implementación de un sistema fotovoltaico requiere del uso de paneles con salidas de 30 o más vatios. Paneles con potencias por debajo de 30W no ofrecen una solución práctica, pues la diferencia en el costo no es suficiente para justificar el mayor número de paneles requeridos. Los módulos formados tienen una potencia que varía entre los 50Wp y los 220Wp, según el tipo y la eficiencia de las células que lo componen.

### 2.2.3 Inversor con cargador Multiplus Compact 12/1200/50-16

El inversor reúne, en una sola carcasa compacta, un potente inversor sinusoidal, un sofisticado cargador de baterías con tecnología adaptable y un conmutador de transferencia de CA de alta velocidad. Además de estas funciones principales, el mismo dispone de varias características avanzadas:

- Multifuncional, con gestión de potencia inteligente.
- Dos salidas de corriente alterna:

La salida principal dispone de la función “no-break” (sin interrupción). El MultiPlus se encarga del suministro a las cargas conectadas en caso de apagón o de desconexión de la red eléctrica/generador. Esto ocurre tan rápido (menos de 20 milisegundos) que los ordenadores y demás equipos electrónicos continúan funcionando sin interrupción.

La segunda salida sólo está activa cuando a una de las entradas del MultiPlus le llega alimentación CA. A esta salida se pueden conectar aparatos que no deberían descargar la batería, como un calentador de agua, por ejemplo (segunda salida disponible sólo en los modelos con conmutador de transferencia de 50A)

- Cargador variable de cuatro etapas y carga de bancadas de baterías dobles:

La salida principal proporciona una potente carga al sistema de baterías por medio de un avanzado software de “carga variable”. El software ajusta con precisión el proceso automático de tres etapas adaptándose a las condiciones de la batería y añade una cuarta etapa para prolongados períodos de carga lenta. Además de lo anterior, el MultiPlus puede cargar una segunda batería utilizando una salida de carga limitada independiente, pensada para cargar una batería de arranque del

motor principal o del generador (dicha salida disponible únicamente en los modelos de 12V y 24V). En la figura 2.2 se muestra el inversor Multiplus.



Fig.2.2- Inversor Multiplus Compact 12/1200/50-16

## 2.2.4 Regulador fotovoltaico Solener RSD 30A 12-24 voltios

### Funciones de este Regulador

- Evitar sobredescargas y descargas profundas de la batería que puedan producir daños irreversibles en la misma.
- Impedir la descarga de la batería a través de los paneles en períodos sin luz.
- Asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.

El regulador serie, controlado por microprocesadores con algoritmo de carga gaseo/flotación y etapas de estado sólido, ha sido diseñado para cubrir el segmento base del mercado, en pequeñas instalaciones domésticas sin monitorización. Su diseño ultraplano (22mm) y el material (chapa galvanizada pintada al horno en epoxy) le confiere una resistencia mecánica y al medio excepcional. Es bitensión automático (puede conectarse a 12V o 24V sin cambiar nada) y se fabrica en versiones de 30 y 50 Amper.

### Protección contra

- Inversión de polaridad.
- Cortocircuitos en la salida.
- Sobrecorrientes en entrada y salida.
- Picos de tensión en paneles baterías y consumo

### Indicadores

Batería (rojo, amarillo, verde)

Normalmente uno de ellos parpadea indicando el estado de carga de la batería. El rojo se queda fijo cuando la salida se corta, sea por corriente excesiva o por que la tensión es menor que la de desconexión durante el tiempo predefinido. El verde queda fijo cuando la entrada está cortada.

Entrada (verde)

Se enciende cuando la entrada de carga está cortada. Esto ocurre durante la fase de flotación, la de igualación y cuando hay una sobrecorriente de entrada. Cuando vuelve a cargar se apaga, por lo que se observa un parpadeo de cadencia variable.

Sobreintensidad (rojo)

Parpadea mientras hay exceso de corriente en la entrada o en la salida. Se queda fijo cuando se ha producido un cortocircuito en la salida o ha pasado cierto tiempo con corrientes excesivas en la entrada o en la salida. Cuando se enciende este LED la etapa correspondiente queda desconectada hasta la pulsación de RESET.

Fase de carga (amarillo)

Indica la fase de carga mediante trenes de encendido según los siguientes códigos:

- Un encendido/ciclo: FLOTACIÓN
- Dos encendidos/ciclo: GASEO .
- Tres encendidos/ciclo: IGUALACIÓN



Fig.2.3- Regulador fotovoltaico Solener RSD 30A 12-24 voltios.

En el anexo #4 se muestra una serie de características correspondientes a este regulador.

### 2.2.5 Batería AGM POWER 260Ah

La batería AGM POWER 260Ah es una batería solar para un perfil de consumo bajo (en instalaciones solares a 12 Voltios) o moderado (en instalaciones solares a 24 Vatios). Es una batería sellada y de arranque o tracción. Por lo tanto en C100 no necesita de mantenimiento alguno del nivel de electrolito y puede utilizarse en cualquier instalación solar aislada cuya demanda eléctrica requiera esporádicamente

descarga de intensidades elevadas esto ocurre esencialmente en cargas eléctricas parecidas a un motor.

Las baterías AGM POWER de 260Ah pueden utilizarse en cualquier kit solar de uso principal en verano y uso esporádico el resto del año. Esta puede estar sometida a movimiento, ya que el electrolito no se encuentra en su estado líquido gracias a las capas de fibras de vidrio absorbentes con la que está fabricada. Esta característica le permite a la batería no sufrir deterioros por evaporación del electrolito, haciendo de ella una batería de excelentes prestaciones de durabilidad y resistencia.

En las tablas mostradas a continuación se observan las características de esta batería.

Voltaje	12V
Capacidad	260Ah en C100, 200Ah en C10

**Tabla.2.1- Características eléctricas de esta batería.**

Temperatura de descarga	-20/50°C
Temperatura de carga	-10/50°C
Temperatura de almacenaje	-20/50°C
Autodescarga	3% de la capacidad por mes a 25°C

**Tabla.2.2- Requerimientos ambientales de esta batería.**

### 2.2.5.1 Métodos Curva de carga

Este análisis se realizará mediante la comprobación de la dinámica de carga en la batería con un nivel de carga fijo de 14W demandado por las dos lámparas fluorescentes y el radio durante tres días atípicos, debido a las condiciones medioambientales que tributa la primavera, el uso de este nivel de carga es debido a que en los horarios del día son las cargas que generalmente se utilizan en las viviendas aisladas.

En este experimento se comenzará el proceso de carga con tres niveles de cargas distintos, el control del estado inicial de la batería se hará mediante el método de circuito abierto y luego del transcurso del día ir comprobando su nivel de carga durante las diferentes inyecciones de energía que le permite suministrar generador fotovoltaico para un nivel de irradiancia determinado, al final del día se hará un control del voltaje en circuito abierto de la batería para analizar cómo fue el proceso de carga para las condiciones medioambientales de ese día.

### 2.2.5.2 Profundidad de descarga

Este análisis se realizará partiendo de un estado inicial de la batería de 12,7V (voltaje de una batería de 12V cuando se encuentra completamente cargada) para este análisis conectarán tres niveles distintos de carga con una potencia fija en cada nivel, comprobando el estado de carga cada 30min mediante el método de circuito abierto, se culminará el proceso de medición cuando la batería alcance un nivel de 11,6V (voltaje de una batería de 12V cuando se encuentra completamente cargada).

Cambiar el nivel de carga y los tipos de carga de manera que se permita evaluar el comportamiento de los componentes del sistema fotovoltaico.

En el inversor se hará este análisis mediante la comprobación de la forma de onda a su salida, para ello se obtendrá la forma de onda con tres niveles de carga conectados, además de la forma de onda del mismo operando en vacío.

## 2.3 Instrumentos y equipos

Para el desarrollo de estos experimentos fue necesario el empleo de una serie de instrumentos y equipos, los cuales fueron de vital apoyo para obtener los resultados. A continuación se describen las características esenciales de cada uno de ellos.

### 2.3.1 Estación climatológica *WatchDog*

Esta estación meteorológica le permite, además de detectar valores como dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar e índice de pluviosidad, también el registro o memorización de tales valores. Puede seleccionar el intervalo de medición de la estación meteorológica. Si lo desea, puede traspasar los datos memorizados desde la estación meteorológica a un ordenador.



Fig.2.4- Estación climatológica *WatchDog*.

### 2.3.2 Pirómetro infrarrojo UNI-T UT301C

Pirómetro UNI-T UT301C está diseñado para medir sin contacto temperaturas de diferentes superficies y objetos. Es idóneo para medir la temperatura de mecanismos de arranque, fusibles, elementos (relés) hermetizados o sellados, soportes y ejes. Permite medir temperaturas en el diapasón de  $-18^{\circ}\text{C}$  a  $550^{\circ}\text{C}$  (mediciones en grados  $^{\circ}\text{C}$  y  $^{\circ}\text{F}$ ).



Fig.2.5- Pirómetro infrarrojo UNI-T UT301C.

#### Particularidades técnicas del pirómetro infrarrojo

- Diapasón de mediciones:  $-18^{\circ}\text{C}$  ~  $550^{\circ}\text{C}$ .
- Memoria volátil.
- Interruptor de láser.
- Función de búsqueda.
- Función de retención de datos "*Data Hold*".
- Posibilidad de medir en grados  $^{\circ}\text{C}$  y  $^{\circ}\text{F}$ .
- Medición de mínimo/máximo.
- Función de cálculo de temperatura promedio y diferencia de temperaturas.
- Zócalo para instalar sobre una trípode.
- Modo de espera.
- Indicador de batería baja.

Pantalla	LCD con iluminación, 32 x 29 mm
Temperatura	Diapasón (de $-18^{\circ}\text{C}$ a $550^{\circ}\text{C}$ )
	Error de medida ( $\pm 1,8^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ )
	Resolución (0,1)
Repetibilidad de resultados	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0,5\%$
Resolución óptica	12:1
Láser	longitud de onda 630-670 nm
Alimentación	cable USB o pila de 9 V (6F22)
Dimensiones	169 x 138 x 53 mm
Peso	270 g

Tabla.2.3- Datos técnicos de este pirómetro.

### 2.3.3 Multímetro UT61E

Multímetro diseñado para medir corriente y voltaje AC/DC, resistencia, capacitancia, frecuencia, ciclo de trabajo, realizar chequeo de diodos y continuidad de circuitos.



Fig.2.6- Multímetro UT61E.

### 2.3.4 Osciloscopio Digital Rigol DS1052E

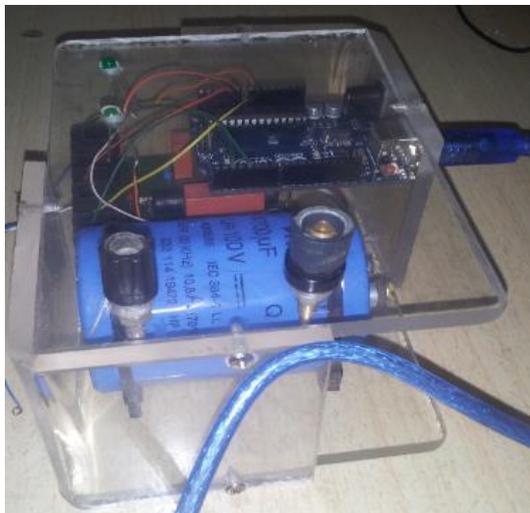
Ancho de banda 50MHz. 1GS/s de frecuencia de muestreo en tiempo real máximo, GSa/s de muestreo equivalente. Capacidad de memoria 1Mpts. Particularidades del osciloscopio utilizado en el estudio. (Ver anexos #6 y #7)



Fig.2.7- Osciloscopio Digital Rigol DS1052E.

### 2.3.5 Trazador de curvas características I-V

El trazador de curvas I-V será el instrumento utilizado para obtener la curva de los módulos, hay dos técnicas principales, una la utilización de modulación de ancho de pulso para simular una carga variable, que lleve al módulo fotovoltaico a lo largo del rango de funcionamiento. La otra técnica es la utilización de un condensador, que hará la simulación de la carga dinámica, absorbiendo corrientes máximas posibles por el panel al inicio de la carga y barriendo el rango de corriente hasta cargar por completo el condensador. Este dimensionamiento del capacitor debe ser adecuado para permitir que el sistema de adquisición de datos tenga el tiempo suficiente para realizar la captura de datos.



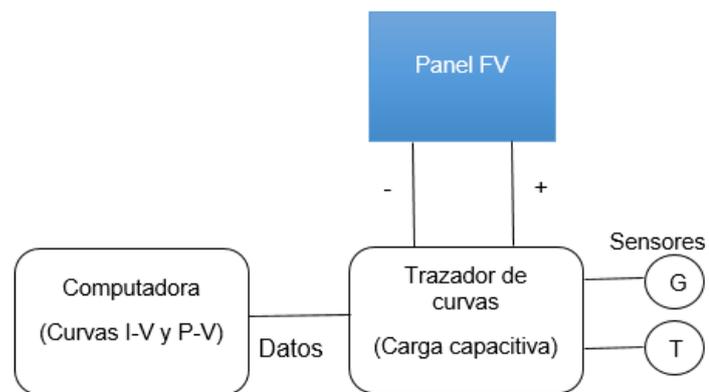
**Fig. 2.8- Trazador de curvas capacitivo.**

En la figura 2.8 se muestra una imagen del trazador de curvas capacitivo utilizado para realizar los distintos tipos de mediciones requeridas a la hora de dar solución a las problemáticas planteadas. Algunos de los valores obtenidos son  $P_n(W)$ ,  $V_{oc}(V)$ ,  $I_{sc}(I)$ ,  $V_{mpp}(V)$ ,  $I_{mpp}(I)$ ,  $P_n(W)$ ,  $V_{oc}(V)$ ,  $I_{sc}(I)$ ,  $V_{mpp}(V)$ ,  $I_{mpp}(I)$ .

El trazador de curvas está compuesto por la carga capacitiva, el sistema de adquisición, y un regulador de voltaje, haciéndolo de esta manera un sistema autónomo sin la necesidad de conectarse a una fuente externa, además de presentar una fácil manipulación a la hora de realizar mediciones sin necesidad de desconectar la carga del panel.

Las cargas capacitivas están constituidas por un banco de capacitores, que se encuentra previamente descargado, al conectarse el arreglo fotovoltaico a medir existe un transitorio de carga del capacitor, que lo llevan del estado de cortocircuito (capacitor descargado), al de circuito abierto (capacitor completamente cargado),

realizando la polarización completa del generador fotovoltaico (barrido). En la figura 2.9 se muestra un esquema general de este método de obtención de curvas I-V.



**Fig. 2.9 Esquema en bloques de la obtención de curvas I-V basados en cargas capacitivas.**

En este tipo de carga no existe disipación de potencia en la polarización del arreglo, pero en consecuencia, se necesitan bancos de gran capacidad para que el tiempo de carga sea suficiente para adquirir una adecuada cantidad de puntos sobre la curva I-V, además los dispositivos de control deben manejar la potencia total del sistema fotovoltaico a ensayar.

La carga del tipo activa está basada en transistores, los cuales trabajan en su zona activa, variando así su resistencia de paso, desde el punto de corte hasta la saturación. Suelen ser controlados por medio de un sistema de modulación por ancho de pulsos o PWM. Estas son de bajo costo y fácil control para polarizar el arreglo fotovoltaico. Su dificultad radica en la importante disipación de potencia a la que son sometidos estos dispositivos.

Para el estudio se utilizó la primera opción, a través de esta se obtienen las curvas características de I-V del panel fotovoltaico. Con la carga capacitiva descargada completamente, se acciona a través del software de adquisición un interruptor virtual para la toma de las mediciones puntuales.

## 2.3.6 Cargas para los experimentos a realizar

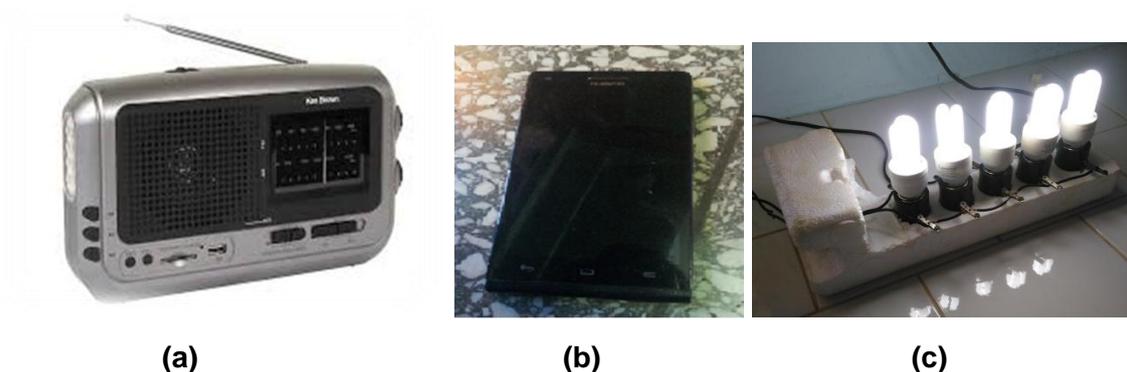


Fig.2.10- (a) Radio STEIMER, (b) Teléfono móvil, (c) Lámparas fluorescentes.

Modelo	G6-L11
Cantidad	1
Potencia	5W
Tensión	100~250V
Frecuencia	50/60Hz

Tabla.2.4- Características de este radio.

Modelo	Landlate
Cantidad	5
Potencia	5W
Tensión	230V
Frecuencia	50/60Hz

Tabla.2.5- Características de las lámparas fluorescentes.

## 2.4 Diseño experimental

Para el análisis del comportamiento de los componentes del sistema se utilizaron los dos paneles conectados en paralelos para una potencia total de 300W, debido a que es la más cercana posible a la potencia de los módulos fotovoltaicos que entregan en nuestro país para viviendas aisladas, el uso de cargas convencionales muy similares a la de los módulos cubanos, hace que la dinámica de trabajo sea lo más real posible a la de estos.

El inversor trabajó a un régimen de operación mucho menor para el que viene diseñado, puesto que cuando trabaja a un régimen mayor no permite que la batería opere con voltajes inferiores a 12V.

El regulador de carga trabaja sin la utilización de los consumos de corriente directa, en los módulos que se dan en nuestro país no existen esas tipologías de carga.

La frecuencia de medición será cada 15 minutos durante un período de 12 horas en los horarios de 6:30am a 6:30pm.

En este trabajo se desarrollarán mediciones en los cuatro puntos identificados en el diagrama de la figura (2.11). En cada punto se hará un control de las diferentes variables de interés en la investigación como se muestra a continuación:

**Punto1: a la salida de los dos paneles:** para ello se usará el multímetro digital realizando mediciones puntuales a la salida de los paneles para el análisis de la tensión que mantiene este durante su trabajo, teniendo en cuenta y almacenando las condiciones medioambientales extraídas por la estación meteorológica WatchDog y la temperatura del panel con el pirómetro infrarrojo UNI-T UT301C.

**Punto 2: a la salida del regulador:** Se hará un control de la energía suministrada a la batería proveniente del generador fotovoltaico, así como la potencia y corriente de carga también se analizará el comportamiento de los indicadores led que trae el mismo por defecto.

**Punto 3: a la entrada de la batería:** En este punto con el multímetro osciloscopio UNI-T UT81B, se realizará un control del voltaje en vacío al inicio y al final del día, además de un control del voltaje puntual cada 15 minutos para comprobar la dinámica de este equipo

**Punto 4: a la salida del inversor:** En este punto se efectuará un análisis de la forma de onda de este, mediante una programación en Matlab (ver anexo #10), que procesa los datos extraídos del equipo de medición, en este caso osciloscopio.

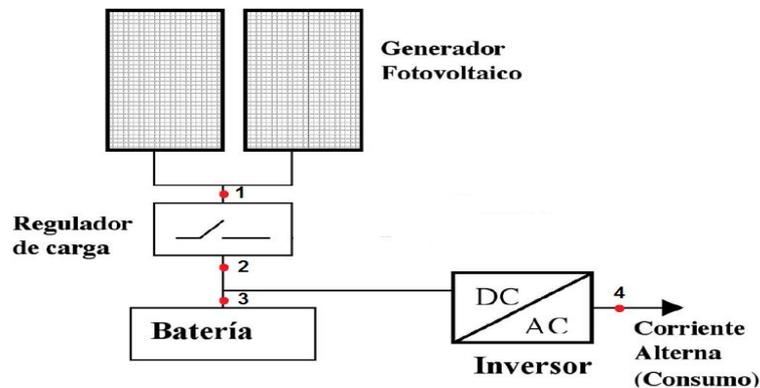


Fig.2.11- Diagrama del sistema fotovoltaico autónomo.

## 2.5 Explicación general del Sistema Fotovoltaico Autónomo

Las células solares constituyen un producto intermedio, proporcionan valores de tensión y de corriente limitados en comparación a los requeridos normalmente por los usuarios, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin soporte mecánico. Se ensamblan de la manera adecuada para formar una única estructura: el panel fotovoltaico que es una estructura sólida y manejable. El número de células en un panel, y por lo tanto su voltaje de salida, dependen de la estructura cristalina del semiconductor usado. Los paneles pueden tener diferentes tamaños: los más utilizados están formados por 40-80 células conectadas eléctricamente en serie, con una superficie que oscila entre los  $0.8 m^2$  a los  $2 m^2$ . Las células están ensambladas entre un estrato superior de cristal y un estrato inferior de material plástico (Tedlar). El producto preparado de esta manera se coloca en un horno de alta temperatura, con vacío de alto grado.

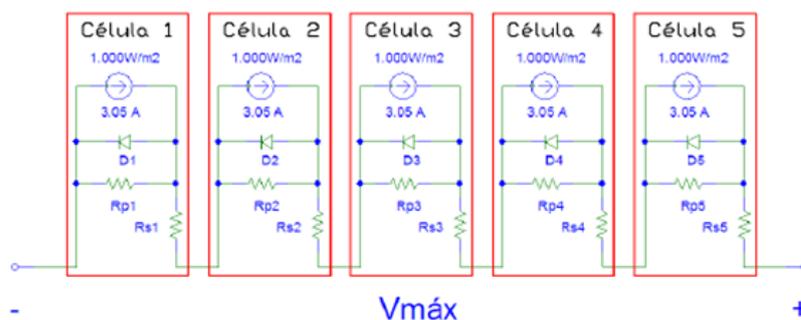


Fig. 2.12 Esquema eléctrico equivalente

El resultado es un bloque único laminado en el que las células están “ahogadas” en el material plástico fundido. Luego se añaden los marcos, normalmente de aluminio; de esta manera se confiere una resistencia mecánica adecuada y se garantizan muchos años de funcionamiento. En la parte trasera del módulo se añade una caja de unión en la que se ponen los diodos de bypass y los contactos eléctricos.

En el caso de este panel en particular, todas las células están conectadas en serie. Una vez obtenida la corriente de cortocircuito, para obtener la tensión en circuito abierto de cada una de las células fotovoltaicas, hay que dividir la tensión de circuito abierto del módulo entre el número de células en serie, teniendo los valores de tensión en circuito abierto y corriente de cortocircuito de cada célula fotovoltaica en condiciones de  $1\ 000\ W/m^2$ ,  $25\ ^\circ C$  y AM 1.5, ahora hay que obtener los valores de tensión y corriente para el punto de máxima potencia de la célula fotovoltaica, realizando las mismas operaciones pero en lugar de escoger los parámetros de circuito abierto y corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico se escogen los del punto de máxima potencia.

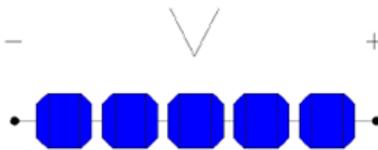


Fig. 2.13 Conexión de las células fotovoltaicas a estudiar.

En la figura 2.13 podemos observar el esquema de conexión de las células a estudiar, es una muestra de 5 células de las 36 que componen el generador fotovoltaico, todas conectadas en serie. Teniendo en cuenta que para estudiar el comportamiento de las células conectadas en serie, se debe tratar cada una como un circuito eléctrico del circuito equivalente descrito. Se obtiene la siguiente figura donde se describe eléctricamente las cinco células fotovoltaicas teniendo en cuenta una característica de radiación y temperatura.

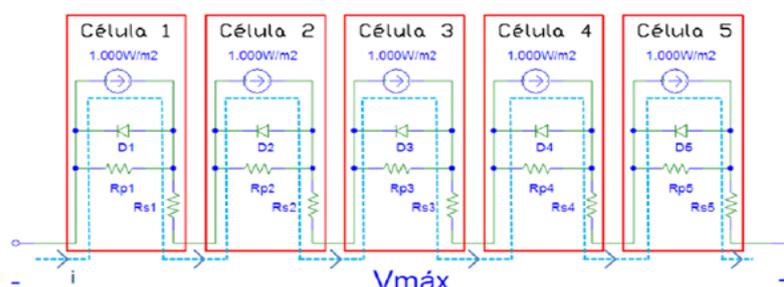


Fig. 2.14 Camino recorrido por la corriente eléctrica en las celdas fotovoltaicas.

En la figura 2.14 se puede observar el recorrido de la corriente eléctrica en las células fotovoltaicas en régimen normal de operación, es decir sin ninguna célula sombreada. Para describir un análisis del estudio a realizar se mostrará el ejemplo con una de las celdas sombreada totalmente como se muestra a continuación.

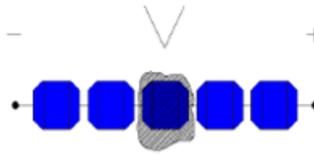


Fig. 2.15 Sombreado de una de las células fotovoltaicas en estudio.

El objeto que tapa la célula no permite a la fuente de la célula 3 suministrar corriente, por lo que el circuito equivalente para este caso se convierte en el siguiente.

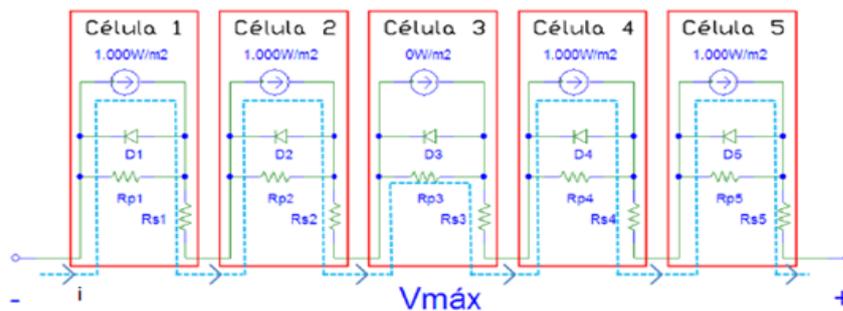


Fig. 2.16 Camino recorrido por la corriente con una de las células sombreada.

En la figura 2.16 se puede observar, que debido a que la fuente no recibe radiación no suministra corriente y se comporta como un circuito abierto, por lo que la corriente circula por las resistencias  $R_{p3}$  y  $R_{s3}$ .

### 2.5.1 Diseño de experimental del sombreado

El estudio se va a realizar a un conjunto de 36 células solares conectadas en serie. Estas células serán las que componen el módulo SW150 poli R6A., con las características del módulo que se detallan en el anexo #3.

Por lo tanto, teniendo las características eléctricas y físicas del módulo fotovoltaico se van a encontrar las características eléctricas de las células fotovoltaicas que componen el módulo, y de este modo poder realizar el comportamiento de las células en serie cuando existen sombras para saber la cantidad de corriente de cortocircuito que suministra cada célula.

### 2.5.2 Experimento 1

Como primer experimento tendremos mediciones realizadas al panel para un mismo nivel de irradiancia en diferentes horarios del día, los cuales componen rangos de mediciones establecidos, estos serían bajo, medio y alto. De esta forma podremos observar las deformaciones que pueden existir en las curvas de potencia en la salida, dando como resultado la variabilidad en el punto de máxima potencia del mismo, los rangos de mediciones son los siguientes:

Bajo ( $0-350 \text{ W/m}^2$ ); Medio ( $350-700 \text{ W/m}^2$ ); Alto ( $700-1050 \text{ W/m}^2$ )

Estos valores fueron tomados por la estación climatológica WhatchDog 2000 y analizados en el software Excel. Inmediatamente el trazador de curvas se conecta por un puerto USB a la PC y es controlado por Matlab, obteniendo el trazado de las curvas se obtienen los parámetros de salida del generador fotovoltaico. Algunos de los resultados obtenidos son  $P_n(W)$ ,  $V_{oc}(V)$ ,  $I_{sc}(I)$ ,  $V_{mpp}(V)$ ,  $I_{mpp}(I)$ ,  $P_n(W)$ ,  $V_{oc}(V)$ ,  $I_{sc}(I)$ ,  $V_{mpp}(V)$ ,  $I_{mpp}(I)$ . Proseguimos al sombreado de las celdas, este se divide en cuatro niveles 0, 9, 18, 27. Estas mediciones se realizaron colocando el panel fotovoltaico en su posición óptima en el municipio de Moa, esta sería orientación sur con un ángulo de inclinación de 18 grados, el primer experimento se realiza sombreado al panel de N-S; S-N ubicándonos geográficamente como se indica en la figura 2.17 (a). Las sombras fueron provocadas y los porcentajes de sombreados analizados para cada estudio. Además podemos decir que estas pruebas se realizaron en el mes de mayo, estación del año de finalización de la primavera y comienzos del verano.

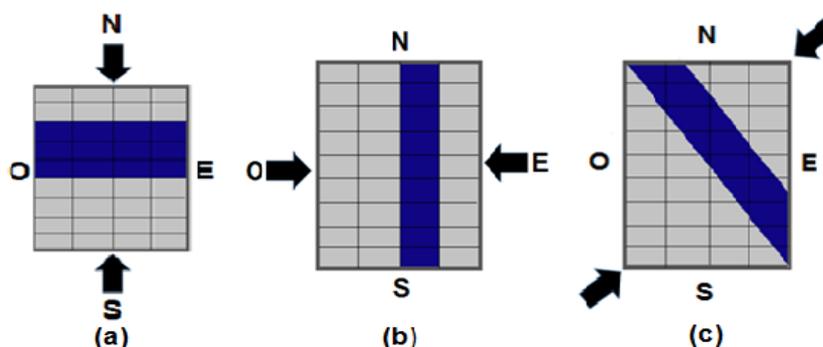


Fig.2.17- Sombreado del panel fotovoltaico en dirección (a) N-S; S-N, (b) E-O; E-O, (c) SO-NE; NE-SO.

### 2.5.3 Experimento 2

Como segundo experimento se realizan sombreados del panel en dirección E-O; O-E, en la figura 2.17 (b) mostramos el análisis de este tipo de sombras provocadas al panel, con el fin de estudiar su comportamiento y la influencia que puede tener en la eficiencia energética del mismo, verificando de esta forma si el comportamiento de las curvas analizadas por el trazador de curvas sería el mismo para este sentido de orientación del panel, se dividió el área del panel en tres partes 8, 16, 28 celdas sombreadas y se comparará con la curva obtenida con cero celdas sombreadas, para poder demostrar el comportamiento de la eficiencia y producción de energía del panel con diferentes celdas sombreadas, se debe dejar claro nuevamente que la realización de los experimentos fueron en la estación del año marcada por el fin de la primavera y comienzos del verano, en los últimos días del mes de mayo.

### 2.5.4 Experimento 3

El experimento número tres al igual que los anteriores se basa en la comparación de las curvas obtenidas por el trazador de curvas capacitivo de paneles fotovoltaicos, realizadas en la misma estación del año que las anteriores y bajo los mismo niveles de irradiancia, las mismas se realizaron durante todo el día con intervalo entre ellas de 20 minutos logrando niveles de generación óptimos de energía, en este experimento el sombreado se realizó SO-NE; NE-SO y de SE-NO; NO-SE como se muestra en la figura 2.17 (c).

Aplicando un análisis matemático sencillo podemos determinar el área del panel fotovoltaico, pues por catálogo ya conocemos sus dimensiones, de esta forma podemos sombrear tres niveles de áreas del panel, serían los siguientes 25%, 50%, 75%, comparados todos con la curva obtenida para cero celdas sombreadas, de aquí se realizará el mismo procedimiento para tres niveles de irradiancia, los mismos serían bajo, medio y alto, verificando la influencia de esta condición en la generación de energía.

Las curvas serán obtenidas y analizadas en el Excel donde se evaluará el comportamiento energético del panel en funciones de diferentes áreas de sombreado de este. Para ello se realizarán las gráficas de corriente en función de la tensión, potencia en función de la tensión, irradiancia en función de la potencia entre otros.

## **2.6 Evaluación del comportamiento energético del panel en funciones de diferentes áreas de sombreado**

Se realizarán patrones para comprobar el comportamiento energético del panel fotovoltaico en funciones de diferentes áreas de sombreado del mismo, utilizando para este análisis el software Excel. De esta forma se obtendrá el gráfico de regresión, comprobando el nivel de linealidad de los datos obtenidos.

Luego de una limpieza de datos y una organización de los resultados, podremos analizar los valores obtenidos y de esta forma verificar la veracidad de la investigación, estas curvas serán analizadas sobre todo en función de la potencia generada a partir de la influencia de las condiciones del medio, y las provocadas con los diferentes sombreados.

## **2.7 Conclusiones del capítulo**

Mediante la metodología descrita es posible el estudio del comportamiento de estos sistemas ante las diferentes condiciones de operación.

Los métodos y materiales utilizados en la investigación se complementan con una base experimental y adecuado equipamiento, lo que garantiza la confiabilidad de los resultados.

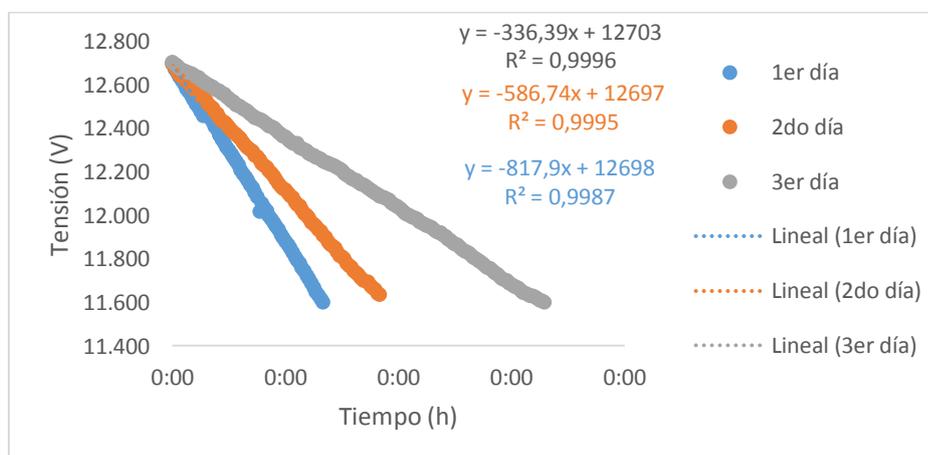
## Capítulo 3. Análisis de los Resultados

### 3.1 Introducción

En este capítulo se muestran los principales resultados de las mediciones realizadas en la instalación experimental. Se obtienen y analizan las curvas I-V de los paneles, sometidos a las simulaciones computacionales para luego procesarlas y definir el rendimiento de estos. Se analiza el rendimiento energético del sistema fotovoltaico autónomo y las curvas resultantes de las cargas conectadas. Se realiza una breve valoración económica y además, se exponen los efectos del sombreado de las celdas del panel utilizado en la investigación.

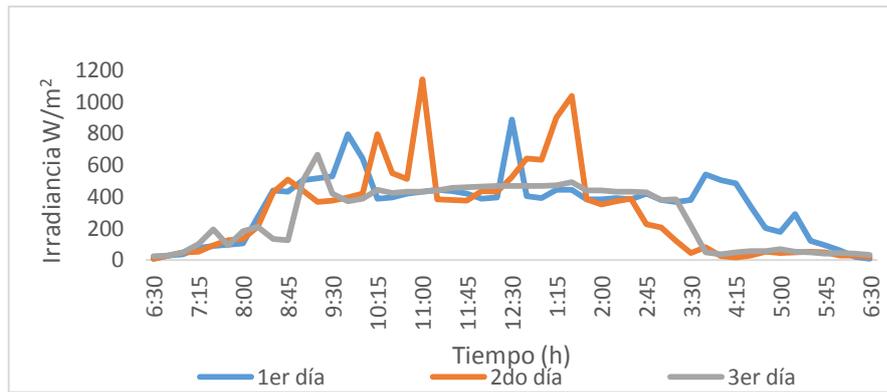
### 3.2 Resultados experimentales de los efectos de la variación de la carga

Se analizó el comportamiento de la batería trabajando a tres niveles de carga, los experimentos realizados arrojan a los resultados presentados en la figura 3.1. Mediante un análisis estadístico podemos obtener la ecuación para cada nivel de potencia con correlación muy cercana a uno lo que nos da la fiabilidad de la ecuación.



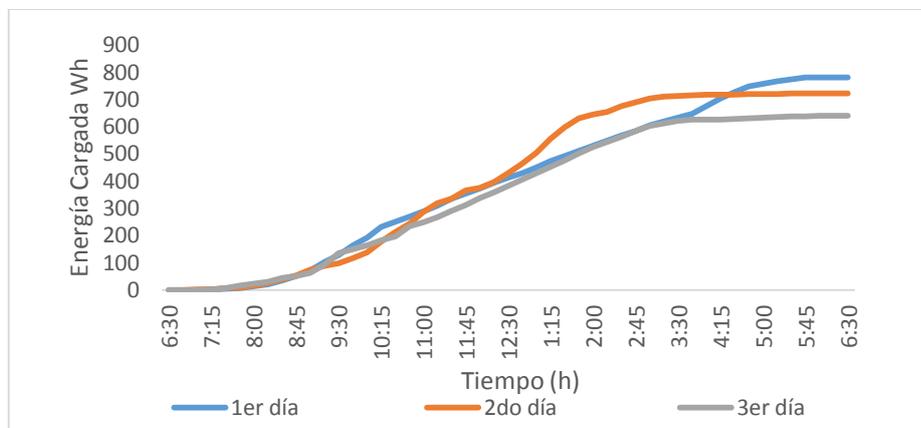
**Fig.3.1- Comportamiento de la batería en régimen de descarga.**

Durante el proceso de carga se analizó los niveles de irradiancia de los días de medición, estos resultados se pueden observar en la figura 3.2 donde se muestran fluctuaciones de irradiancia debido al comportamiento irregular del clima en estos días.



**Fig.3.2- Comportamiento de la irradiancia durante los días de medición.**

Para estos niveles de irradiancia la energía suministrada por el panel se comportó como se muestra en la figura 3.3. Se pudo apreciar que el comportamiento del primer día fue el más provechoso para la producción de energía, ya que se mantuvo creciente hasta alrededor de las 5:45pm para luego lograr su estabilidad a diferencia de los días posteriores, donde la producción de energía se mantuvo prácticamente invariable a partir de las 4:45pm, debido a que el estado de nubosidad propició niveles de irradiancia a los cuales el panel no es capaz de producir energía.



**Fig.3.3- Comportamiento de la energía suministrada por el panel fotovoltaico.**

El proceso de carga de la batería para estos niveles de irradiancia se observa en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 correspondientes al primer, segundo y tercer día de medición respectivamente, mostrándose además la medición del estado de carga inicial y final de la batería en cada día. Se visualizó en los puntos en rojo de cada gráfico el valor de la tensión en circuito abierto de la batería, los estados iniciales y finales del proceso de carga. Se aprecian variaciones en los niveles de voltaje debido a que este nivel lo impone la energía que está entregando en ese instante el panel fotovoltaico. Durante el primer día que fue el de mayor producción de energía del panel bajo estas condiciones, se observó que la tensión varió ascendentemente al

final del día en 0.554V, en los días de menor producción la variación de voltaje fue de un valor inferior a 0,2V.

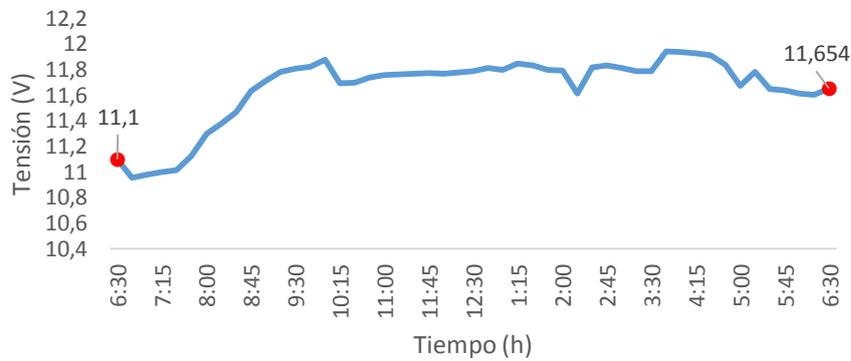


Fig.3.4- Comportamiento del proceso de carga durante el primer día.

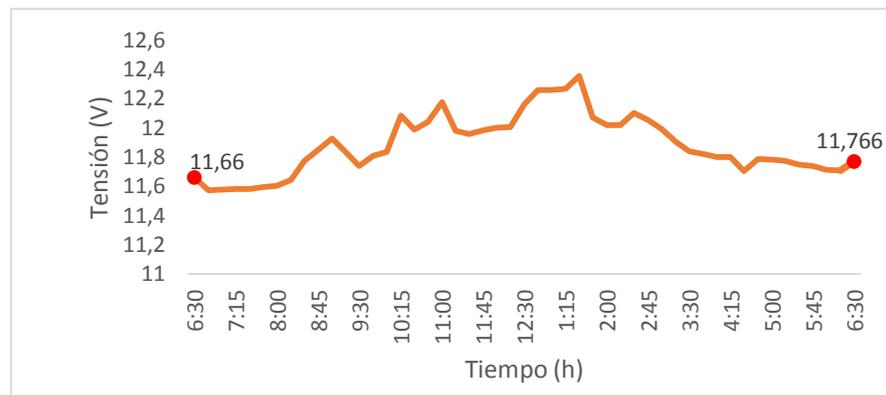


Fig.3.5- Comportamiento del proceso de carga durante el segundo día.

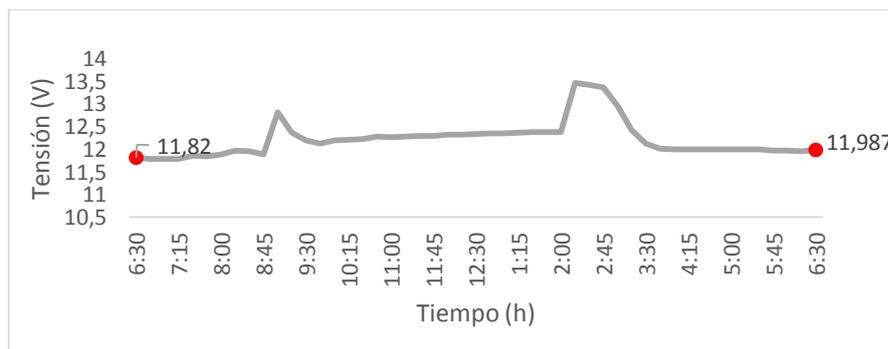
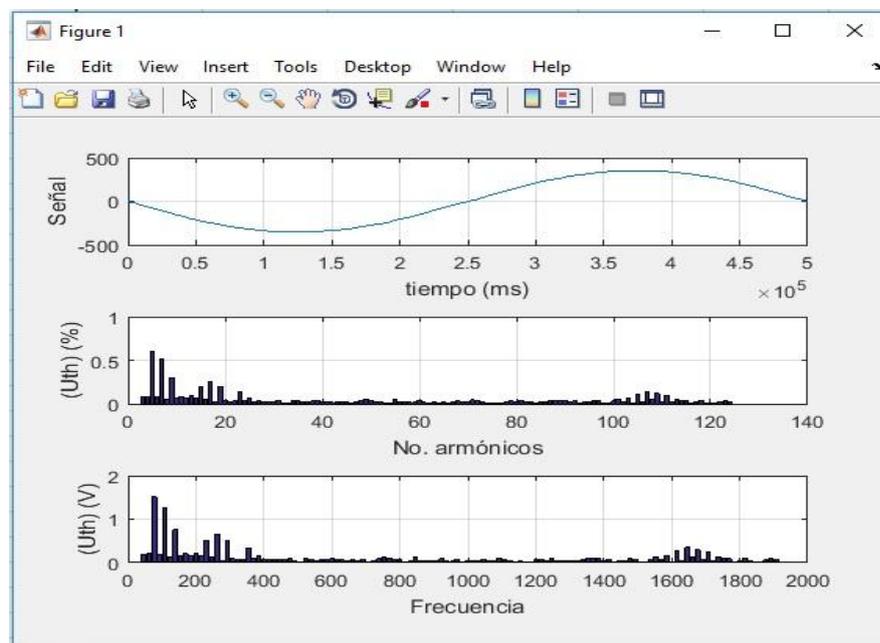


Fig.3.6- Comportamiento del proceso de carga durante el tercer día.

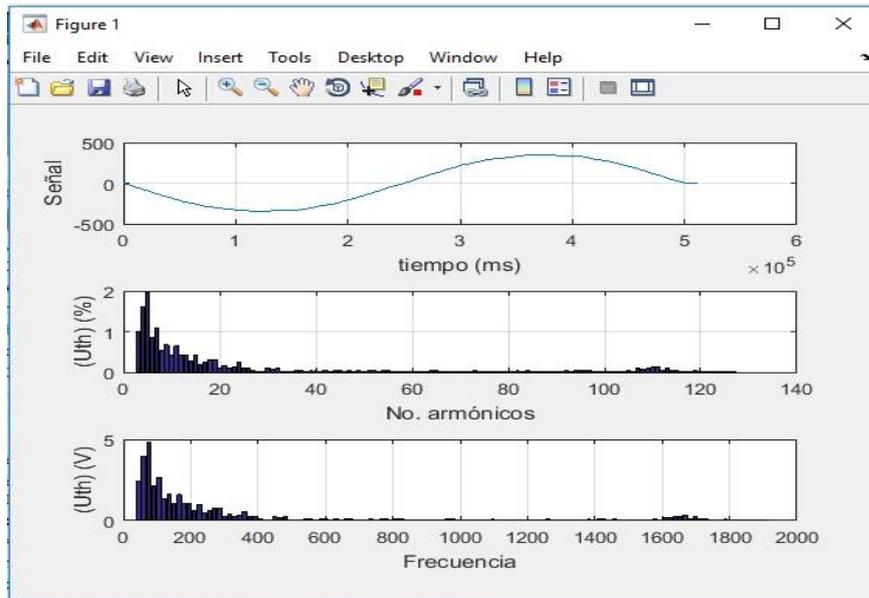
Comportamiento del inversor con la variación de la carga:

Durante el funcionamiento en vacío el comportamiento de la forma de onda del inversor se mantuvo con una forma de onda sinusoidal pura sin risos ni fluctuaciones considerables, véase en la figura 3.7. El porcentaje de armónico de tercer orden de la forma de onda del inversor se mantuvo muy inferior al 0,5% de la tensión nominal, el más pronunciado fue el de séptimo orden con un valor ligeramente superior al 0,5%, el armónico de orden 11 tuvo un valor igual a 0,5%, el comportamiento de los demás armónicos estuvo inferior a los valores antes mencionados, lo que se concretó que no son perjudiciales, pues según la norma(IEEE-519), los armónicos inferiores al 5% de la tensión nominal no son valores a considerar significativos en un análisis de calidad de la onda.



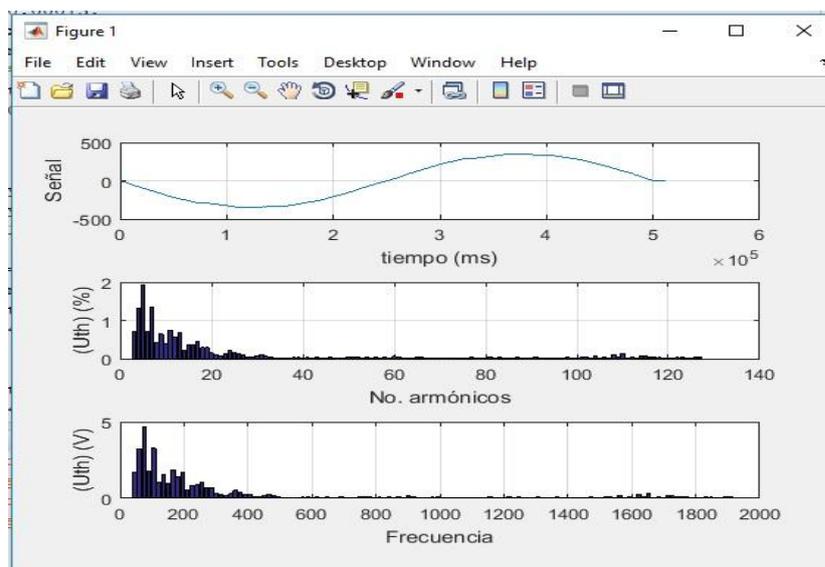
**Fig.3.7- Análisis de la forma de onda del inversor sin carga.**

Cuando se le conectó la carga de 14W correspondiente a la demanda de dos bombillos y un radio, la forma de onda se comportó de la siguiente manera, véase en la figura 3.8. Con este nivel de carga se observó la aparición de rizados en la forma de onda del inversor. El porcentaje de armónico de tercer orden se mantuvo en el 1% de la tensión nominal, el más pronunciado fue el de orden 5 con un valor de 2%, el armónico de orden 7 tuvo un valor ligeramente mayor a 1%, el comportamiento de los demás armónicos estuvo inferior a los valores antes mencionados, lo que se concretó que no son perjudiciales, según las normas los armónicos inferiores al 5% de la tensión nominal no son valores significativos en un análisis de calidad de la onda.



**Fig.3.8- Análisis de la forma de onda del inversor con carga baja de 14W.**

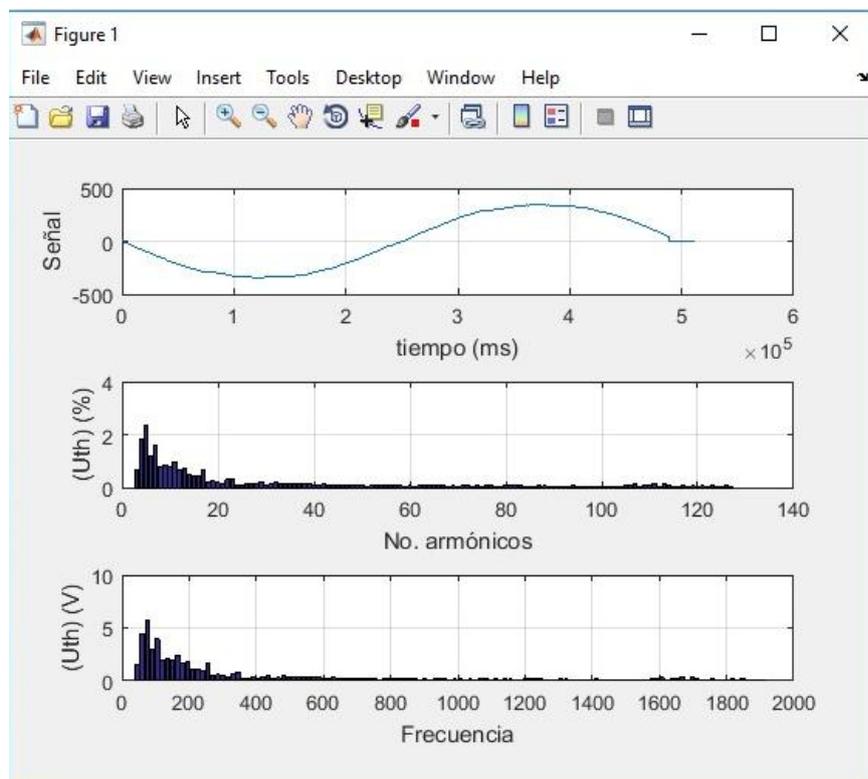
Cuando se le conectó la carga de 25W correspondiente a la demanda de 5 bombillos la forma de onda del inversor se mantuvo con rizados. El porcentaje de armónico de tercer orden se mantuvo ligeramente inferior al 1% de la tensión nominal, el más pronunciado fue el de orden 5 con un valor cercano al 2%, el armónico de orden 7 tuvo un valor de 1,5% de la tensión nominal, el comportamiento de los demás armónicos estuvo inferior a los valores antes mencionados, lo que se concretó que no son perjudiciales según lo establecido. (Véase en la figura 3.9).



**Fig.3.9- Análisis de la forma de onda del inversor con carga media de 25W.**

Cuando se le conecto la carga de 34W correspondiente a la demanda de 5 bombillos, un radio y un celular durante el proceso de carga la forma de onda se comportó de la siguiente manera, véase en la figura 3.9.

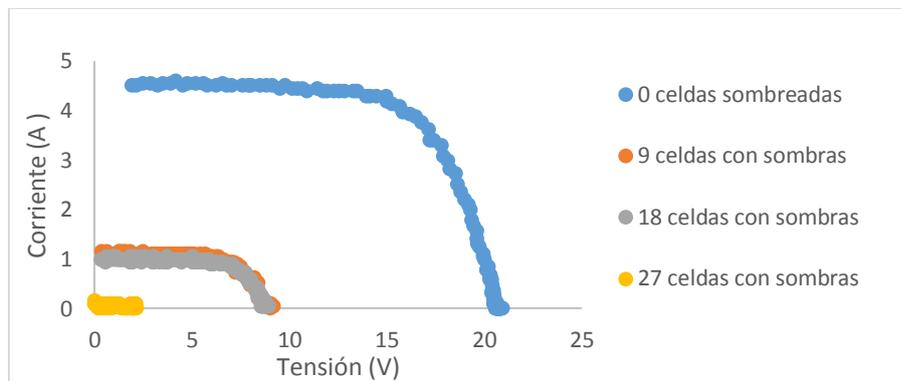
Durante el funcionamiento con este nivel de carga el comportamiento de la forma de onda del inversor se mantuvo con rizados un poco más pronunciados que en las anteriores pruebas, El porcentaje de armónico de tercer orden se mantuvo ligeramente inferior al 2% de la tensión nominal, el más pronunciado fue el de orden 5 con un valor ligeramente superior a dos 2%, el armónico de orden 7 tuvo un valor ligeramente menor que 2% de la tensión nominal, el comportamiento de los demás armónicos estuvo inferior a los valores antes mencionados, lo que se concretó que no son perjudicial ya que según la normas los armónicos inferiores al 5% de la tensión nominal no son valores a considerar significativos en un análisis de calidad de la onda.



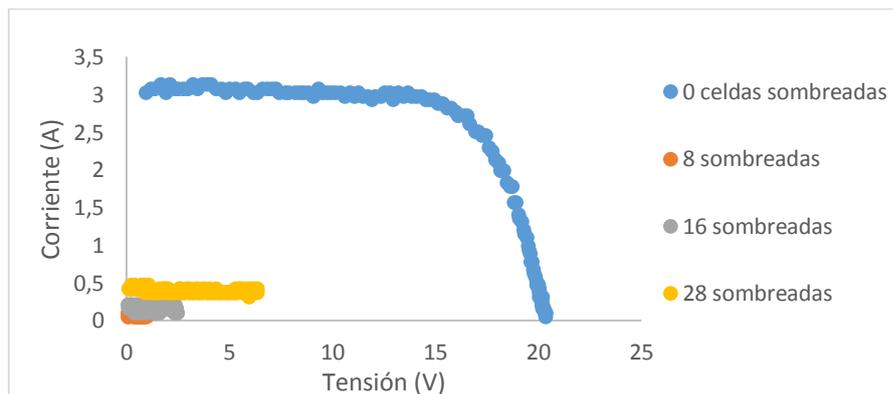
**Fig.3.10- Análisis de la forma de onda del inversor con carga media de 34W.**

### 3.3 Resultados experimentales de los efectos de la sombra

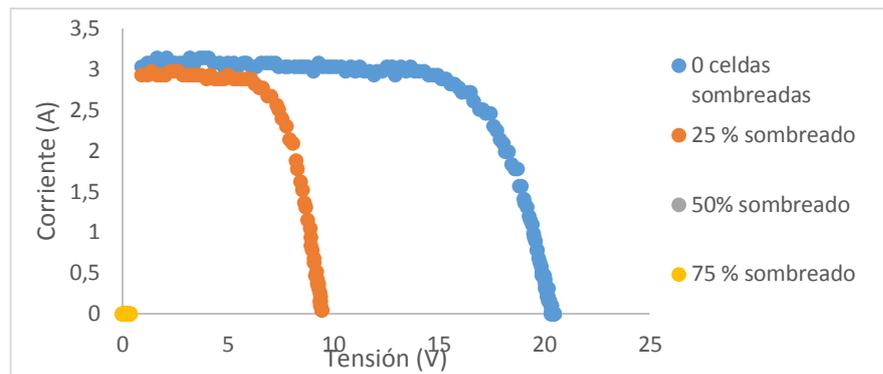
Las mediciones fueron analizadas en Excel, como primer experimento se realizaron mediciones al panel en diferentes horarios del día a iguales niveles de Irradiancia, efectuando los distintos niveles de sombreados de celdas en las direcciones descritas en el diseño experimental (Ver figura 2.17). Los gráficos siguientes representan un análisis del nivel de Irradiancia bajo ( $0-350 \text{ W/m}^2$ ), lo cual permite establecer comparaciones entre los resultados, conocer los comportamientos de la corriente por las celdas del generador fotovoltaico y la circulación de esta cuando existe algún tipo de sombras sobre el mismo.



**Fig.3.11- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección E-O.**



**Fig.3.12- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S; S-N.**



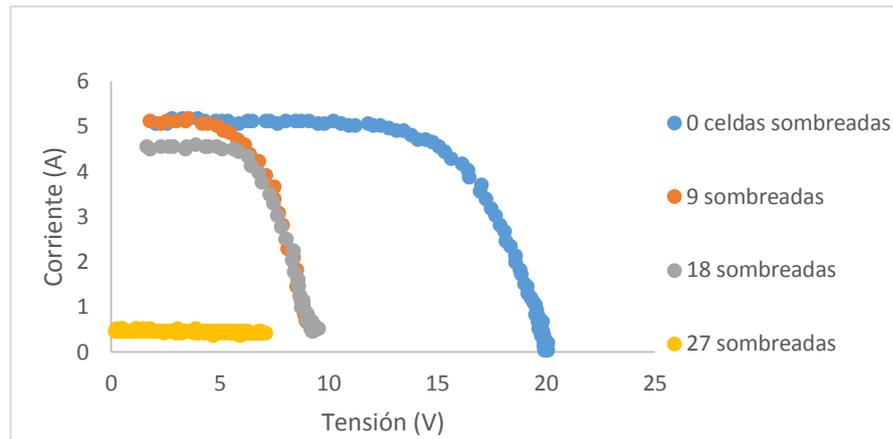
**Fig.3.13- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE-SW.**

Las figuras 3.11; 3.12; 3.13 indican las curvas de salida del panel fotovoltaico para un nivel de irradiancia de  $344 \text{ W/m}^2$  dado por los rangos de medición desglosados en el trabajo como nivel bajo, se pueden observar las diferentes curvas de potencia obtenidas en gráficos de corrientes en función de la tensión, para un valor de tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) va a ser cero, pues no existirá ninguna carga, y para un valor de Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) la tensión alcanzaría su valor máximo. El área debajo de esta curva, es la potencia suministrada por el generador, además de los valores ya obtenidos el trazador de curvas nos da el punto de máxima potencia, la tensión a circuito abierto y su punto de máxima potencia, entre otros.

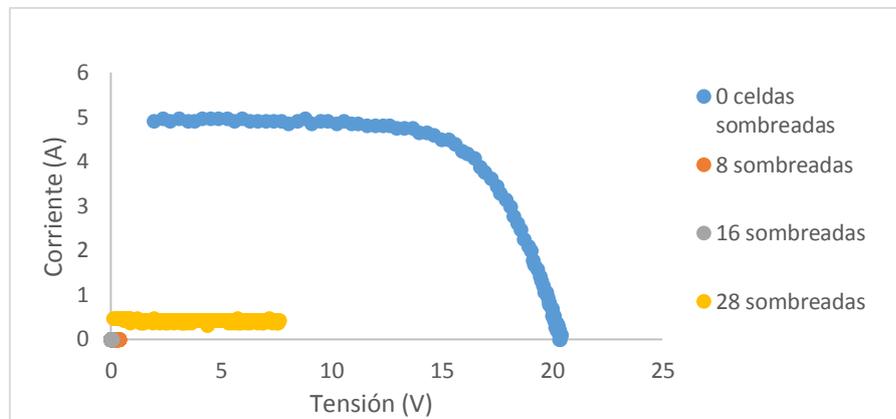
El primer caso se corresponde a las sombras en dirección E-O; O-E, dando como resultado que el comportamiento de los parámetros de salida del generador fotovoltaico es el mismo en las dos direcciones, esto se debe a la conexión entre sus celdas, las mismas se encuentran conectadas en serie con dos diodos de bypass, de los módulos conectados en serie se obtienen las gráficas I-V y P-V.

En el caso de las curvas superiores pertenecientes al gráfico I-V, los tres tipos de sombreados aplicados al módulo y la comparación con la curva del panel trabajando a régimen normal, es decir sin ninguna celda sombreada, se pueden comparar los parámetros de tensión en circuito abierto y corriente en cortocircuito.

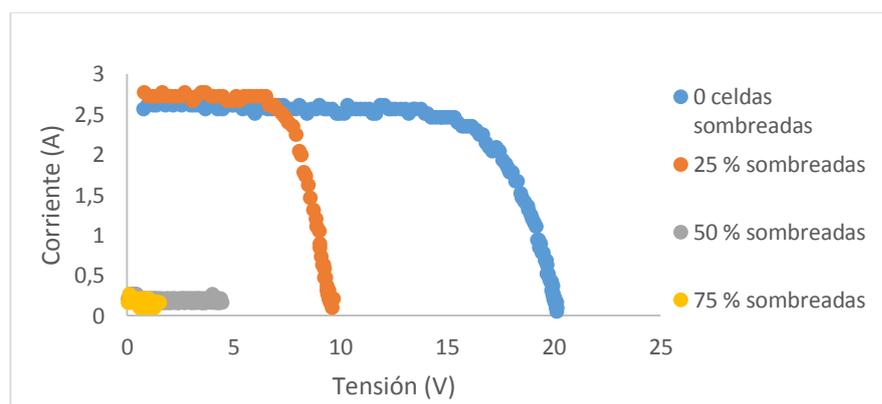
Analizando cada gráfico por separado se puede observar las variaciones en la tensión de circuito abierto y en la corriente de cortocircuito, siendo el experimento número dos (Sombreado N-S; S-N) el de menor valor de generación mostrado, es decir, tanto la tensión como la corriente sufren un gran descenso, provocado por el tipo de conexión de las células y los diodo de bypass conectados entre ellas, invalidando casi 80 % de la producción de potencia en el panel.



**Fig.3.14-** Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección E-O.



**Fig.3.15-** Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S.



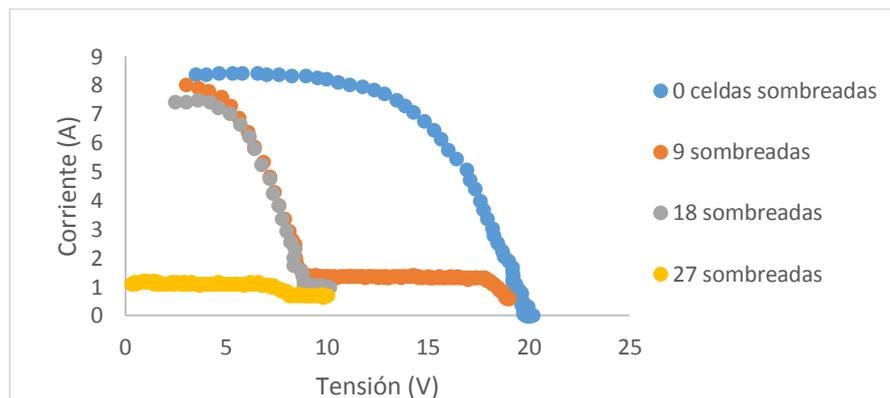
**Fig.3.16-** Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE.

En este caso se realiza el estudio igual que el anterior, el nivel de Irradiancia aumentará hasta  $665 \text{ W/m}^2$ , nivel considerado medio en nuestro trabajo, por la etapa del año en que se realizaron las mediciones y las condiciones existentes en

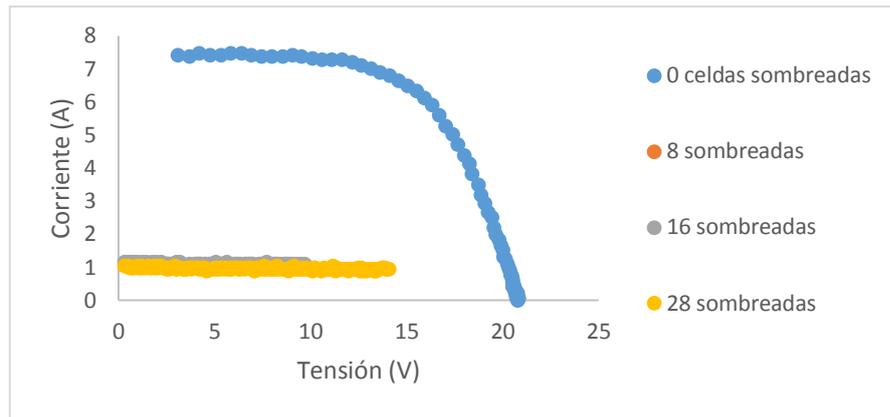
nuestro país. En el sombreado N-S; S-N se obtienen los menores valores de tensión a circuito abierto y de corriente de cortocircuito, además se comprobó mediante las mediciones efectuadas que la generación de energía del panel fotovoltaico es la misma en ambos sentidos, facilitando el análisis de los resultados.

En el primer experimento con este valor de Irradiancia se evidencia un descenso no muy significativo de la corriente de cortocircuito y valores mayores en la tensión a circuito abierto. La corriente de cortocircuito varía desde 5.07 A hasta 4.55 A para 18 celdas con sombras y manteniéndose casi igual para 9 celdas sombreadas, los niveles de tensión a circuito abierto caen a la mitad del valor producido por el panel con cero celdas sombreadas, siendo este de 20.55 V para 0 celdas sombradas y de 9.56 V para 9 y 18 celdas con sombras valores muy similares debido a la conexión de las celdas y los diodos bypass, los cuales invalidan la misma cantidad de celdas para este análisis.

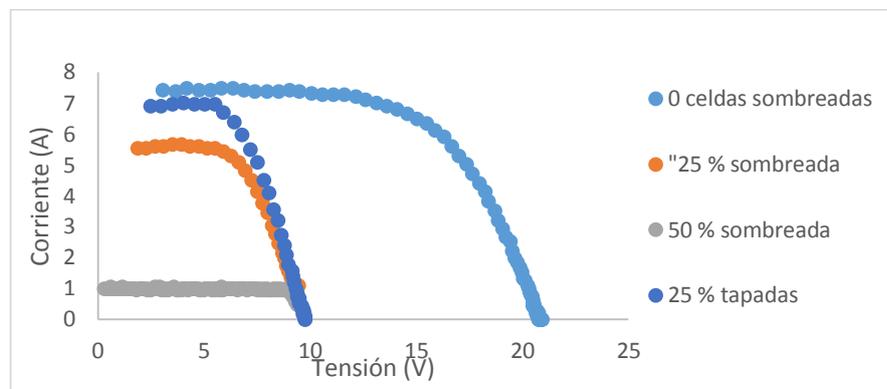
Se puede observar una caída mucho mayor en la tensión y corriente con 27 celdas sombreadas,  $\frac{3}{4}$  del panel fotovoltaico no recibe irradiación directamente, por lo que no se realiza el efecto fotoeléctrico de manera correcta, obteniendo pérdidas en la producción de energía. Estas formas de las sombras oblicuas sobre el panel no son tan comunes, pero se puede observar cómo influye en la eficiencia del mismo solo con 25% del panel sombreado, la tensión de circuito abierto disminuye a la mitad de su valor cuando tiene 0 celdas sombreadas con este nivel de radiación.



**Fig.3.17- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiación y diferentes sombreados en dirección E-O.**



**Fig.3.18- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S.**



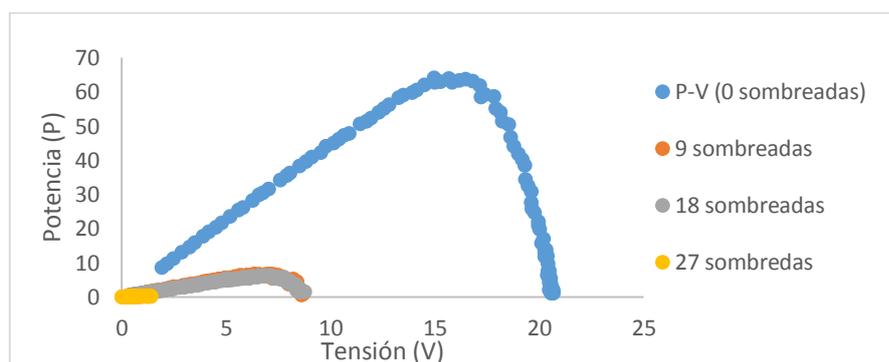
**Fig.3.19- Comportamiento real de las curvas de potencia del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE-SW.**

Analizando las curvas anteriores de I-V y comparándolas con las curvas del panel con cero celdas sombreadas, se observa que las diferencias más importantes vienen dadas por la corriente de cortocircuito y la tensión a circuito abierto, como se ha comentado en el estudio del comportamiento de las células fotovoltaicas, cuando una célula recibe menor radiación su corriente también disminuye, cabe destacar que estos módulos tienen las celdas formando dos cadenas de 18 celdas cada una y conectadas todas en serie con dos diodos de bypass situado entre ellas. La distribución de estas cadenas es en forma de “U” cuando el módulo está apoyado con el lado corto en el suelo. Por lo tanto, todas las cadenas de este módulo conectado en serie tienen un porcentaje de sombras. Teniendo en cuenta esta configuración y la forma de provocar las sombras, se puede observar en la gráfica que la corriente y la tensión se encuentran muy afectadas en este caso, de ahí que la curva I-V sufra una caída tan extrema.

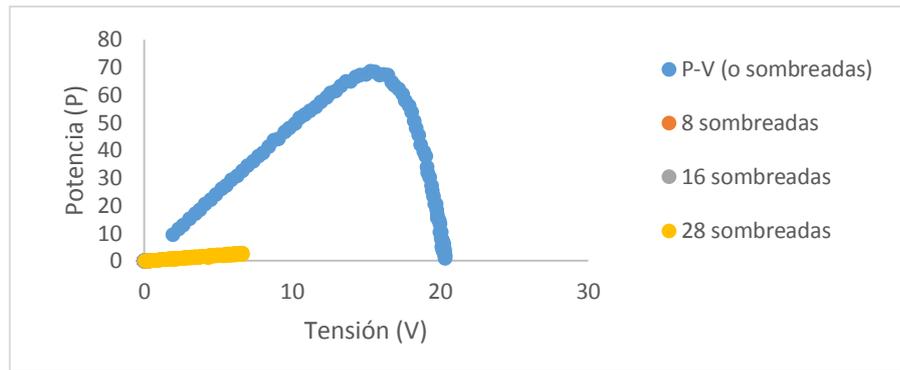
En el caso número dos donde el sombreado se realiza en dirección N-S no influye en nada el número de celdas sombreadas, el comportamiento seguirá siendo el mismo y caerá la producción de energía del panel en niveles muy altos y con ello sus niveles de eficiencia, por lo que se recomienda un estudio muy detallado a la hora de montar un parque fotovoltaico, la posición de los paneles y la distancia entre ellos para que no incidan las sombras de unos sobre otros. A partir del análisis efectuado anteriormente, se puede concluir que en lugares donde el sol sea bajo se deben colocar los paneles con el lado más largo apoyados en el piso para evitar la incidencia de las sombras en los mismos.

### 3.4 Curvas de Potencia en función de la tensión de salida de los módulos

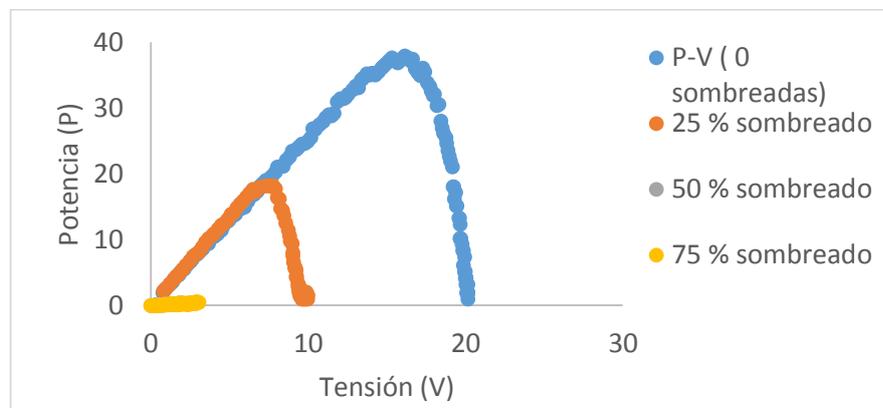
Las figuras 3.20, 3.21, 3.22 representan las curvas de potencia en función de la tensión y con ello las diferentes afectaciones de la producción de potencia a la salida del módulo. De acuerdo al análisis realizado de las gráficas anteriores, se conoce que la mayor afectación está en el sombreado de N-S por las condiciones de conexión ya conocidas, se puede observar cómo las potencias aumentan muy poco en relación a los distintos tipos de sombreados provocados, lo que se debe dejar claro es que con cualquier cantidad de celdas sombreadas el efecto es el mismo para este nivel de radiación, solamente en el experimento número tres con un 25 % sombreado del panel su comportamiento es la mitad de la curva generada con respecto a la curva con cero celdas sombreadas.



**Fig.3.20- Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección E-O.**

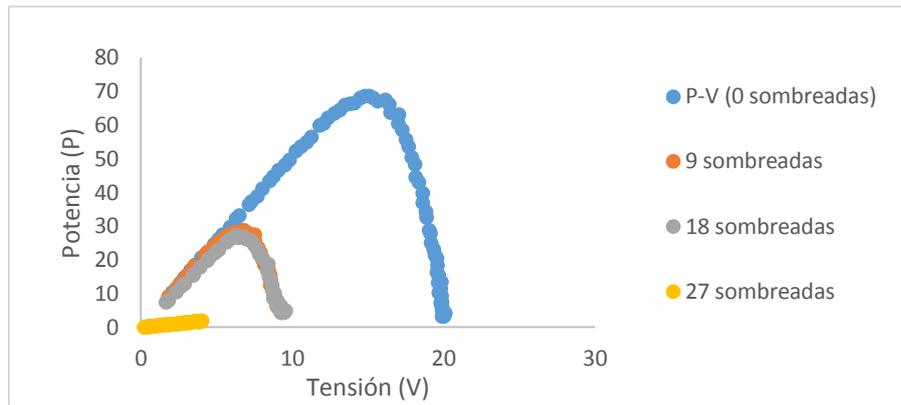


**Fig.3.21-** Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S.

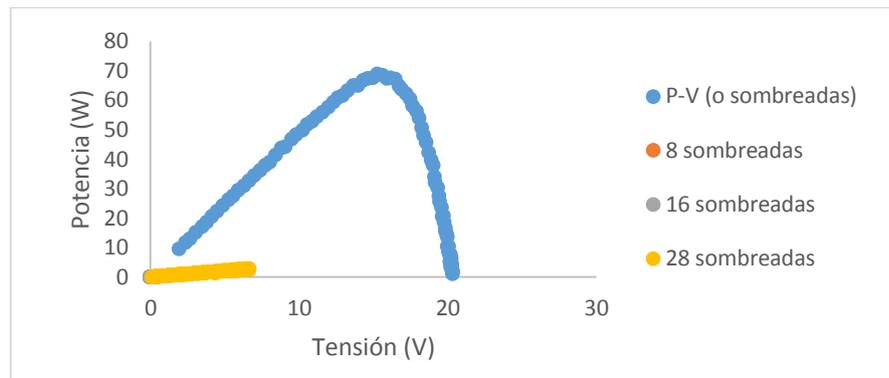


**Fig.3.22-** Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel bajo de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE-SW.

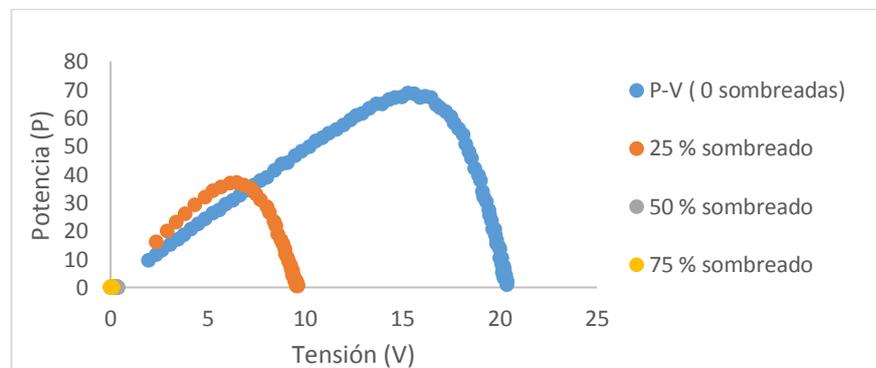
Para el nivel de sombreado medio el comportamiento sigue siendo el mismo, sufre grandes caídas en la potencia para diferentes niveles de sombreados, solo en los experimentos 1 con 9 y 18 celdas sombreadas, y en el 3 con 25 % del panel sombreado la potencia aumenta a la mitad de la producida con 0 celdas sombreadas, estando en valores de la mitad de la tensión a circuito abierto con respecto a la curva, comparándolos con los demás resultados obtenidos. (Véase figuras 3.23, 3.24, 3.25)



**Fig.3.23-** Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección E-O.

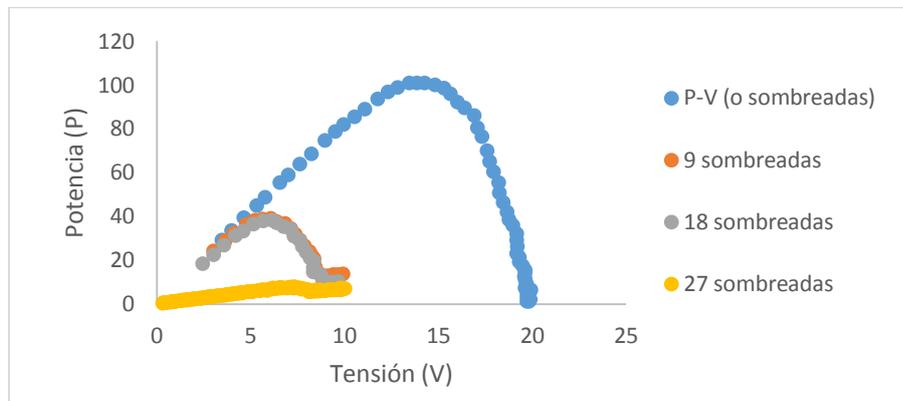


**Fig.3.24-** Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S.

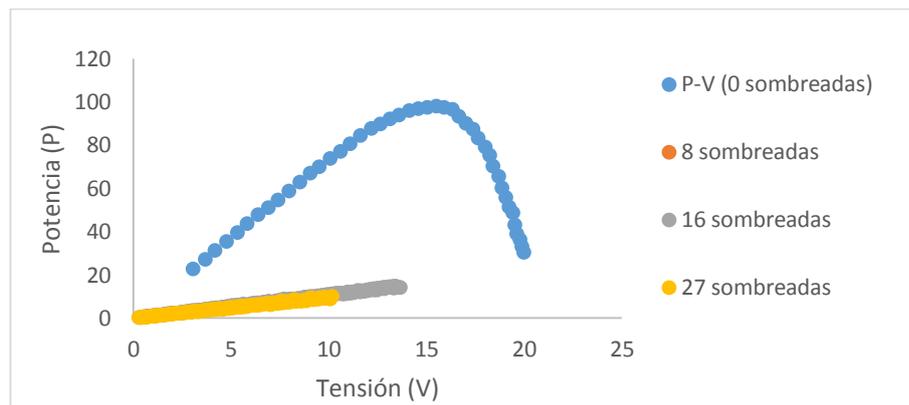


**Fig.3.25-** Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel medio de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE-SW.

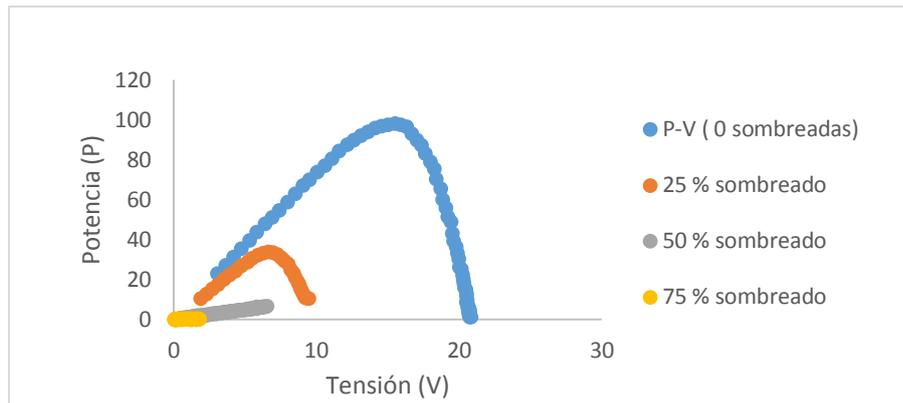
Con altos niveles de radiación el comportamiento sigue siendo el mismo, solo que la generación de energía aumenta porque la fuente principal es mayo, el experimento número 2 se mantiene como el de menor valor de potencia de salida para los distintos tipos de sombreados al generador fotovoltaico, esto invalida el módulo por completo con todo tipo de sombras que incidan en dirección horizontal sobre el panel. En el experimento número 1 se observa que tapando una sola hilera del panel invalidamos dos de ellas, pues se encuentra un diodo de bypass conectado entre las mismas evitando el paso de la corriente por esta cadena, cuidándola de una posible avería por puntos calientes ocasionados por el efecto del sombreado u otro tipo de condiciones. (Consultar figuras 3.26, 3.27, 3.28)



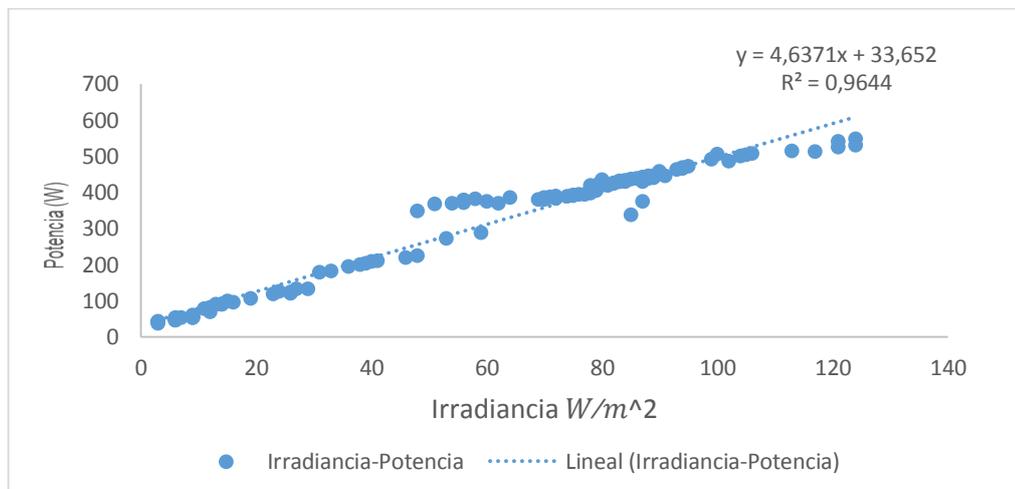
**Fig.3.26- Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiancia y diferentes sombreados en dirección E-O.**



**Fig.3.27- Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiancia y diferentes sombreados en dirección N-S.**



**Fig.3.28- Comportamiento real de las curvas de potencia-tensión del panel SW150 poli R6A con un nivel alto de irradiancia y diferentes sombreados en dirección SE-SW.**



**Fig.3.29- Gráfico de la Irradiancia en función de la potencia del generador fotovoltaico.**

En la figura 3.29 se puede observar un gráfico de dispersión con los valores de Irradiancia en función de la potencia producida por el generador fotovoltaico durante los tres días de medición, mostrándose variaciones leves de potencia a un mismo nivel de irradiancia, debido a la influencia de la temperatura en la producción de energía del panel. Se constata que tendencia es lineal en todo el gráfico, la ecuación nos indica este valor de linealidad y su coeficiente de correlación nos da la consistencia de su validez. Esta ecuación de correlación y su coeficiente fueron calculados con un sencillo análisis estadístico con el propósito de dar firmeza a este estudio.

### 3.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en los experimentos realizados. A partir de las gráficas utilizadas se muestra el comportamiento del sistema fotovoltaico para diferentes condiciones de operación, distintos niveles de irradiancia, variación en los niveles de carga y descarga de la batería, afectaciones del sombreado. Además se hizo un análisis con la transformada rápida de Fourier para conocer la forma de onda de la salida del inversor y las afectaciones del aumento de carga en esta. Estos resultados alcanzados permitieron conocer las principales afectaciones de la variación de la carga al SFVA y el efecto de sombreado en la generación de energía del módulo fotovoltaico.

## Conclusiones generales

- Los sistemas fotovoltaicos autónomos son de vital importancia para el país, estos permiten una mejora de la calidad de vida de las personas que no pueden recibir el servicio brindado por el Sistema Energético Nacional (SEN). Las investigaciones realizadas sobre este tema han propiciado un notable avance en la implementación de las energías renovables en nuestro caso la solar fotovoltaica.
- La instalación del SFVA permitió la realización óptima de los experimentos a partir de las diferentes características de los componentes del mismo.
- El comportamiento eléctrico del panel bajo el efecto de las cargas se manifiesta teniendo en cuenta los niveles de irradiancia, para niveles altos la producción de energía es óptima y para niveles bajos ocurre lo contrario. La batería se comporta de manera similar para la variación de las cargas pues su profundidad de descarga depende del aumento de esta.
- El efecto del sombreado en el comportamiento energético del panel fotovoltaico es relevante, pues los niveles de eficiencia del mismo disminuyen notablemente, sobre todo cuando las sombras se producen desde el lado corto de estos paneles, en nuestro estudio sería de N-S, en este caso la potencia desciende a un 25 % de los valores obtenidos con 0 celdas sombreadas.

## Recomendaciones

- Dar continuidad a esta investigación teniendo en cuenta diferentes condiciones del clima y variadas estaciones del año.
- Efectuar un análisis de la influencia de la temperatura en la dinámica de la carga y descarga de la batería.
- Realizar los experimentos del sombreado con un banco de pruebas de paneles fotovoltaicos profesional, logrando un condicionamiento en los niveles de confianza y veracidad.
- Verificar la programación interna del inversor, pues cuando la batería llega a un valor de tensión por debajo de 12 V se desconecta el sistema automáticamente.

## Bibliografía

1. Abella, M. (2014). *Sistema Fotovoltaico*. (Tesis de Maestría). España: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
2. Acevedo, F. (2016). *Diseño de una instalación solar fotovoltaica con capacidad para 3 kilovatios*. (Tesis de Grado). Colombia: Escuela de Ciencias Básicas, tecnología e Ingeniería Tecnología en Electrónica Bogotá.
3. Alabart, J.A, Batista, I. (2006). *Sistemas Solares Fotovoltaicos*. Cuba: CITMA
4. Arenas, D. y Zapata, H. (2011). *Energía solar y sus aplicaciones*. (Tesis de grado). Colombia: Universidad tecnológica de Pereira.
5. Cruz, F. (2017). *Implementación de un sistema fotovoltaico con conmutación a la red para parte de las cargas del CEETAM en el ISMMM*. Cuba: ISMM “Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa”
1. Fernández, J. (2009). *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. España: Universidad Carlos III de Madrid. Descargado de: <http://e-archivo.uc3m.es>.
2. SMA Solar Technology (2015). *Gestión de sombras: Funcionamiento eficiente de instalaciones fotovoltaicas parcialmente sombreadas con OptiTrac*. Global Peak. SMA Solar Technology AG.
3. Guerrero, José. (2013). *Enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante aprovechamiento de energía geotérmica de superficie*. (Tesis de Maestría). Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
4. Lillo Bravo, I. (2006). *Energía solar: Pérdidas de radiación por inclinación, orientación y sombras*. España: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Cádiz.
5. López, R. (2012). *Análisis térmico de las celdas fotovoltaicas en un sistema interconectado a la red*. (Tesis de Maestría). México: Universidad Veracruz.
6. Loaeza, F., Ramiro, C. (2012). *Metodología de un Sistema Fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso en luminarias del edificio 3 ESIME Zacatenco*. (Tesis de grado). México: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
7. Martínez, R. (2017). *Estimación de la eficiencia de un sistema de energía eléctrica basado en paneles solares considerando variables ambientales en la ciudad de Bogotá*. (Tesis de Maestría). Bogotá: Universidad Santo Tomás.

8. *Sectores Industriales* (2016). *Notas de Aplicación Armónicos en Sectores Industriales*. Alemania
9. Obando, E., Vargas R. (2016). *Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular*. Colombia: Universidad del Cauca.
10. Pallejá, J. (2012). *Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico*. Italia: Universitat Rovira i Virgili.
11. Piriz, I. (2013). *Energía solar térmica y fotovoltaica aislada para pequeñas comunidades en Perú*. (Tesis de Maestría). España: Universidad Técnica de Cataluña.
12. Departamento Técnico de SunFields Europe (2016). *Placas Solares: Caja de conexiones y diodos de protección (bypass)*. España: Departamento Técnico de SunFields Europe. Descargado de [www.sfe-solar.com](http://www.sfe-solar.com)
13. Ramón A., Pineda R. (2015). *Análisis del Rendimiento de los acumuladores de Energía del Sistema Fotovoltaico Existente en la Universidad Politécnica Salesiana sede cuenca*. (Tesis de Grado). Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
14. Ruzafa, L. (2009). *La energía solar en la edificación: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica*. (Tesis de Grado). España: Universidad Politécnica de Cartagena
15. Serrano, I., Muñoz, M.A. (2013). *Evaluación del uso de paneles solares como elemento de sombreado en invernaderos*. Madrid: España.
16. Tirapu, F. J. (2011). *Aplicación para el cálculo de instalaciones solares térmicas en edificios residenciales*. España: Universidad Pública de Navarra.
17. Vidal, S (2017). *Análisis de una manta flexible fotovoltaica de silicio amorfo bajo diferentes condiciones climatológicas y de posición*. España: Universidad Carlos III de Madrid.

## Anexos

### Anexo # 1: El número de ciclos de vida de una batería y la profundidad de su descarga

Profundidad de descarga (%)	Numero de ciclos de una batería de ciclo poco Profundo	Numero de ciclos de una batería de ciclo Profundo
10	1300-1600	2400-3300
20	900-1300	1800-2700
30	600-900	1200-2000
40	400-500	900-1300
50	350-425	800-1050
60	300-350	650-925
70	250-325	600-800
80	125-225	550-750

### Anexo # 2: Influencia de la temperatura en las baterías de Pb-ácido (Cortesía de la Revista HOME POWER)

Temperatura del Electrolito (°C)	Reducción de la vida útil(°C)
25	0
30	30
35	50
40	65
45	77
50	87
55	95

**Anexo # 3: Datos técnicos del módulo fotovoltaico Sunmodule SW 150 poly R6A.Fuente: (Solarworld, 2016)**

<b>Punto de máxima potencia (Pmax)</b>	<b>150 Wp</b>
<b>Tensión a circuito abierto (Voc)</b>	<b>22,5 V</b>
<b>Tensión a máxima potencia (Vmpp)</b>	<b>18,3 V</b>
<b>Corriente de cortocircuito (Isc)</b>	<b>8,81 A</b>
<b>Corriente a máxima potencia (Impp)</b>	<b>8,27 A</b>
<b>Coefficiente de variación de Isc/Temp.(Ki)</b>	<b>0,007136</b>
<b>Coefficiente de variación de oc/Temp.(Kv)</b>	<b>-0,08325</b>
<b>Cantidad de celdas</b>	<b>36</b>

**Anexo # 4: Características de funcionamiento del regulador fotovoltaico Solener RSD 30A 12-24 voltios.**

Tensión nominal(cambio automático)	12/24 ó 24/48 voltios
Tensión máxima de entrada	50/60 ó 85/105 voltios
Intensidad máxima de entrada	30/50 A según el modelo
Intensidad máxima de salida	30 A
Sobrecarga admisible	25%
Autoconsumo	< 15mA
Perdidas máximas generación/consumo	3,1/1.0 vatios(30A)
Diodo inteligente en la entrada	En el modelo 30 A

Tipo de regulación	Serie
Tipo de batería	Seleccionable
Estado de carga	Carga profunda, flotación, igualación

**Anexo # 5: Especificaciones técnicas de este multímetro**

Pantalla	LCD de 3¾ (3999) dígitos, 60 x 60 mm	
DC voltaje	Diapasón	400mV/4V/40V/400V/1000V
	Precisión	±(0.8%+8)
AC voltaje	Diapasón	4V/40V/400V/750V
	Precisión	±(1%+15)
DC corriente	Diapasón	400µA /4000µA/40mA/400mA/4A/10A
	Precisión	±(1%+8)
AC corriente	Diapasón	400µA /4000µA/40mA/400mA/4A/10A
	Precisión	±(1,5%+8)
Resistencia	Diapasón	400Ω/ 4kΩ/40kΩ/400kΩ/4MΩ/40MΩ
	Precisión	±(1%+5)
Capacitancia	Diapasón	40nF/400nF/4µF/40µF/100µF
	Precisión	±(3%+8)
Frecuencia	Rango	10Hz~10MHz
	<b>Precisión</b>	<b>±(0.1%+3)</b>

**Anexo # 6: Particularidades de este osciloscopio.**

Modelo	DS1052E.
Frecuencia de muestreo en tiempo real máximo	1GSa/s
Capacidad de memoria	1Mpts
Ancho de banda	50MHz
Funciones avanzadas de inicio	Edge, Video, Pulse Whidth, Slope, Alternate
Sensibilidad	Ajustable
Mediciones automáticas	20
Almacenamiento	BMP y CSV
Funciones matemáticas	+, -, x, FFT, Invert
Interfaz estándar	USB Device,USBHost,RS-232
Impresión directa con impresoras	Si, compatible con PictBridge por vía de USB

**Anexo # 7: Datos técnicos de este osciloscopio.**

Modelo	DS1052E.
Ancho de banda	50MHz
Canales	Canal doble + External Triger
Muestreo equivalente	10GSa/s
Tiempo de aumento	7ns
Tiempo de exploración horizontal	5ns/div to 50s/div
Modo de inicio	Edge, Video, Pulse, Width, Slope, Alternativ
Impedancia de entrada	1MFI15pF
Sensibilidad vertical	2mV/div to 10V/div
Entradas	DC, AC, tierra
Voltaje máximo de entrada	400V(DC+AC pico)
Roll Range	500ms/div to 50 s/div
Almacenamiento	100-240V/50VAmx

**Anexo # 8: Características de este radio.**

Modelo	ST-81
Cantidad	1
Potencia	4W
Tensión	230V
Frecuencia	50Hz

## **Anexo # 9: Leyes y normativas para la instalación de un sistema Fotovoltaico autónomo en Cuba.**

### **MARCO LEGAL**

Referente a las disposiciones y normas legales relacionadas con las instalaciones solares fotovoltaicas en Cuba existen: Leyes que regulan, promueven el uso de las energías alternativas y que reglamentan la producción de energía eléctrica fotovoltaica y su conexión a las redes eléctricas públicas; y normas, que son del alcance de este trabajo, eminentemente técnicas, que rigen las características técnicas y la calidad de las instalaciones solares fotovoltaicas (construcción, materiales, equipos etc.). (Antonio Vázquez Perez; Raynel Díaz Santos; María Rodríguez Gámez; Espino Ares).

**EN 62477-1:** Requisitos de seguridad para sistemas y equipos de conversión de potencia de semiconductores.

**UNE-EN 62109:** Seguridad de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de potencia fotovoltaicos.

**UNE 206006 IN:** Ensayos de detección de funcionamiento en isla de múltiples inversores fotovoltaicos conectados a red.

**UNE-EN 61683:** Sistemas fotovoltaicos. Acondicionadores de potencia.

Procedimiento para la medida del rendimiento.

**UNE-EN 50548:2012:** Cajas de conexiones para módulos fotovoltaicos.

**UNE-EN 61730-1:2007:** Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos

Parte 1: Requisitos de construcción.

**UNE-EN 50521:2010:** Conectores para sistemas fotovoltaicos. Ensayos y requerimientos de seguridad.

**UNE-EN 50539-11:2013:** Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias de baja tensión. Dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias para aplicaciones específicas incluyendo corriente continua.

**UNE-EN 61853-1:2011:** Ensayos del rendimiento de módulos fotovoltaicos (FV) y evaluación energética. Parte 1: Medidas del funcionamiento frente a temperatura e irradiancia y determinación de las características de potencia.

**UNE-HD 60364-7-712:2017:** Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 7-712:

Requisitos para instalaciones o emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (FV).

**UNE 20460-7-712:2006:** Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 7-712: Reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (PV).

**UNE-EN 61646:2009:** Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.

**UNE-EN 62446:2011:** Sistemas fotovoltaicos conectados a red. Requisitos mínimos de documentación, puesta en marcha e inspección de un sistema.

**UNE-EN 50583-1:2016:** Sistemas fotovoltaicos en edificios. Parte 1: Módulos BIPV bajo diferentes condiciones climatológicas y de posición(módulos fotovoltaicos integrados en edificios).

**UNE-EN 50380:2003:** Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.

**UNE-EN 60904-1:1994:** Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos. (IEC 60904-1:2006).

**UNE-EN 60904-3:1994:** Dispositivos fotovoltaicos. Parte 3: Fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (FV) de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia.

**UNE-EN 61277:2000:** Sistemas fotovoltaicos (FV) terrestres generadores de potencia. Generalidades y guía.

**UNE-EN 61724:2000:** Monitorización de sistemas fotovoltaicos. Guías para la medida, el intercambio de datos y el análisis.

**CEI 61730-2:2004:** Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV).

Parte 2: Requisitos para ensayos.

**UNE-EN ISO 14001:2015:** Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.

### Anexo #10: Programación en Matlab. Para encontrar la transformada rápida de Fourier.

```

%clear,clc
delta=0.00013;
C = max(y)/sqrt(2);
t = linspace(0,length(y),length(y));
Un=C; % Tensión nominal del circuito
subplot(311)
plot(1000*t,y),grid
ylabel('Señal')
xlabel('tiempo (ms)')
    Y = fft(y);
    Pyy = abs(Y(1:length(Y)/2)); % Modulo
    Pyy=Pyy/max(Pyy)*100;
    Urea1 = Pyy(2)*Un/100; % Tn en volt para 1er armónico.
f = (0:length(Y)/2-1)*(1/delta)/(length(Y));
    Uhar = Pyy(2:length(f)/2)*Un/100;
k=0:length(Pyy)-1;
subplot(312)
bar(k(4:length(f)/2),Pyy(4:length(f)/2)),grid
ylabel('(Uth) (%)')
xlabel('No. armónicos')
subplot(313)
bar(f(4:length(f)/2),Pyy(4:length(f)/2)*Un/100),grid
ylabel('(Uth) (V)')
xlabel('Frecuencia')

```